

动量比对两股互击式喷嘴雾化特征的影响

郑刚^{1,2}, 冯伟¹, 聂万胜¹, 周立新³

(1. 装备学院 航天装备系, 北京 101416;

2. 西昌卫星发射中心 技术部, 四川 西昌 615000;

3. 中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 基于 CLSVOF(coupled level-set and volume of fluid)方法对两股互击式喷嘴雾化过程进行了数值模拟, 仿真结果与实验结果进行对比, 并详细考察了动量比对液膜特性的影响. 结果表明: ①CLSVOF 方法能对射流撞击形成的液膜形态进行有效捕捉, 计算获得的液膜形态与实验结果一致. ②两股不同孔径的射流在撞击点撞击过程中, 由于大孔径一侧的部分射流未参与撞击, 而中心位置的液体在撞击之后速度迅速下降, 周围的液体则保持撞击前的速度, 使得射流撞击之后形成弧形状液膜. ③在不同动量比条件下, 射流撞击后轴线位置的合成角主要取决于参与撞击射流的动量比, 数值计算结果与理论计算结果吻合较好, 误差均小于 10%.

关 键 词: 液体火箭发动机; 两股互击式喷嘴; 动量比; 雾化特性; CLSVOF 方法

中图分类号: V434

文献标志码: A

Effect of momentum ratio on atomization characteristics of unlike-doublet impinging jets injector

ZHENG Gang^{1,2}, FENG Wei¹, NIE Wan-sheng², ZHOU Li-xin³

(1. Department of Space Equipment,

Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. Technology Department,

Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan 615000, China;

3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: Numerical simulation was carried out on the atomization process of unlike-doublet impinging jets injector based on the CLSVOF (coupled level-set and volume of fluid) method. The simulation results were compared with the experiment results, and the effect of momentum ratios on liquid sheet characteristics was investigated in detail. The results show that: (1) The CLSVOF method can efficiently capture the liquid sheet characteristics formed by jet impact. The calculated liquid sheet agrees well with the experiment result. (2) In the impinging process of jets, part of the jet flow of large diameter nozzle is not involved in the impact, while the velocity of liquid in the central position drops rapidly after impact, and at the same time, the surrounding liquid maintains the velocity before impact, which results in the formation of cured liquid sheet. (3) Under the conditions of different momentum ratios, the resultant angle in the axis position after impact mainly depends on the momentum ratio of

收稿日期: 2015-04-26

基金项目: 国家重大基础研究资助项目(613193); 国家自然科学基金(91441123)

作者简介: 郑刚(1987—), 男, 四川凉山州人, 工程师, 博士, 主要从事液体火箭发动机喷注雾化研究. E-mail: zhenggang_hai@163.com

通讯作者: 聂万胜(1969—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士, 研究方向为航空宇航推进与先进流动控制. E-mail: nws1969@126.com

impinging jets. The simulation results are in good agreement with the theoretical calculation results, with the errors less than 10%.

Key words: liquid rocket engine; unlike-doublet impinging jets injector; momentum ratio; atomization characteristics; CLSVOF method

喷嘴雾化结果的好坏对液体火箭发动机推力室的燃烧效率和燃烧稳定性有着直接关系^[1],开展喷嘴雾化特性方面的研究,不但对喷注器优化设计有着重要意义,还可直接用于蒸发混合以及燃烧过程分析.对于使用可贮存推进剂(如四氧化二氮/偏二甲肼)的液体火箭发动机,直流撞击式喷嘴由于其结构简单、制造方便,且具有良好的雾化混合特性而被广泛应用.

由于直流撞击式喷嘴雾化混合过程复杂且具有较强的三维特性,国内外针对直流撞击式喷嘴雾化特性的研究主要以实验和理论分析为主^[2-8].近年来,随着计算机技术和计算方法的飞速发展,数值仿真方法在喷嘴雾化特性的研究中得到越来越广泛的应用^[9-15].国内外学者针对喷嘴雾化特性的数值研究方法不尽相同,但总体上主要集中于对数值计算方法的验证上,研究具体喷嘴结构参数及工况条件对雾化特性的影响还相对较少.

本文采用VOF(volume of fluid)与Level-Set耦合方法对两股互击式喷嘴雾化过程进行三维数值仿真,重点考察了不同动量比条件下的喷嘴雾化特性.

1 数学模型

1.1 两相流守恒方程

对射流撞击雾化特性的数值模拟主要涉及两个物理模型:两相流模型和湍流模型.两相流模型主要计算液体与环境间流动的耦合问题,湍流模型则用于计算两相的湍流流动情况.

在计算过程中假定流动是等温的,不考虑液相蒸发,无须求解能量方程,假设液相与环境气体均为不可压缩流体,两相流的流动控制方程如下:

连续方程

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

动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为密度; ν 为运动黏度; p 为压强; $\mathbf{g}$ 为重力加速度.

1.2 CLSVOF 方法

CLSVOF 方法的基本思想则是将 Level-Set

方法和 VOF 方法的优缺点进行有效综合,以克服 Level-Set 方法在对流输运过程中不能保证流体质量守恒,以及 VOF 难于精确重构多相流交界面特性的缺陷,从而提高不可压缩两相流相界面的计算精度^[16].

要实现 Level-Set 和 VOF 两种方法的耦合,首先要通过 Level-Set 函数来定义 VOF 体积函数来建立起两种算法之间的关系.

Level-Set 通过定义一个距离函数 ϕ 来捕捉界面

$$\phi(x, t) = \begin{cases} H[x, \Gamma(t)] & x \in \Omega_1 \\ 0 & x \in \Gamma \\ -H[x, \Gamma(t)] & x \in \Omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 H 表示 x 到气液界面的距离;子区域 Ω_1 和 Ω_2 分别表示两种介质所处区域;气液界面则用 Γ 表示,满足 $\Gamma(t) = \{x \in \Omega; \phi(x, t) = 0\}$.

将 Level-Set 函数改写为类似 VOF 方程的函数

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \phi) = 0 \quad (4)$$

式中 t 为时间.这样动量方程式(2)可写为

$$\frac{\rho \partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] - \sigma \kappa \delta(\phi) \nabla \phi + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

其中当 $|\phi| < a$ 时, $\delta(\phi) = \frac{1 + \cos(\pi \phi/a)}{2a}$; 当 $|\phi| > a$ 时, $\delta(\phi) = 0$. $a = 1.5h$ (h 为最小网格尺寸); σ, κ 分别表示表面张力系数和气液界面曲率.

1.3 表面张力计算方法

计算液体表面张力采用 CSF (continuum surface force) 方法,其核心思想是将作用于相界面上的表面力等效为作用于相界面附近一定宽度区域的连续体积力,在计算中实现为在动量方程中加入体积力这一项^[17].气液界面上的表面力可分为两部分:第1部分为由气液界面局部曲率引起的表面力;第2部分则是由气液界面上表面张力系数变化而引起的切向力.由于计算中气液介质的物性均保持不变而忽略切向力作用.

2 几何模型及工况参数

图1给出了某型液体火箭发动机两股互击式喷注单元结构示意图. 两股射流所对应的喷嘴孔径 d_1, d_2 分别为 1 mm 和 1.2 mm, 孔径比为 1.2, 撞击角 2θ 为 60° , 射流撞击前长度 L (喷嘴出口处至撞击点处的距离) 为 5 mm.

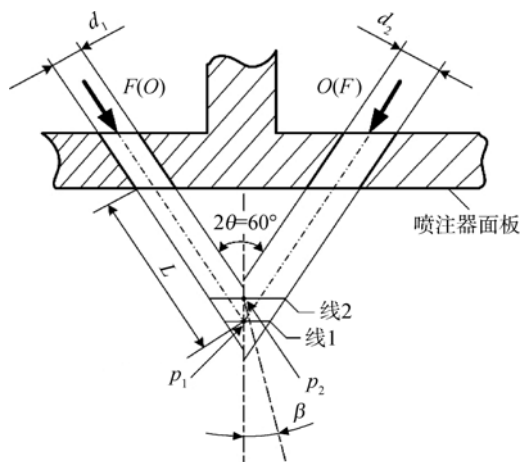


图1 两股互击式喷嘴结构示意图

Fig.1 Schematic of unlike-doublet impinging jets injector

由于射流撞击所形成的液膜具有较强的三维特性, 因此进行了全尺寸三维计算. 根据初步实验所观察的喷雾范围, 将计算区域大小设置为 $30\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 10\text{ mm}$.

图2给出了计算区域的具体网格划分. 由于两股射流撞击形成了与 yz 平面平行的液膜, 因此在射流喷射方向及液膜平面附近主要区域进行了加密处理. 其中, 网格总数约为 160 万, 最小网格尺寸为 $80\text{ }\mu\text{m}$. 计算过程中, 时间步长为 $1 \times$

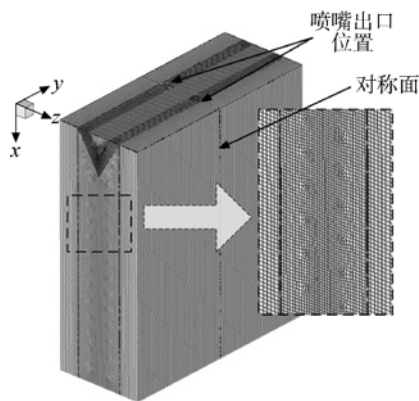


图2 计算网格划分

Fig.2 Computational grid generation

10^{-7} s , 压力速度耦合采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法. 仿真计算过程中从喷嘴出口处开始进行计算, 计算工况条件如表1所示, 射流入口为速度入口边界, 根据喷嘴实验件构型进行估算, 将射流湍流度设为 15%.

表1 计算工况参数

Table 1 Parameters of computation condition

序号	撞击角/ ($^\circ$)	孔径比	动量比	流量/(g/s)	
				大孔	小孔
1	60	1.2	1.0	18.1	15.0
2			1.2	19.7	15.0
3			1.4	21.3	15.0
4			1.6	22.8	15.0

3 仿真结果与分析

3.1 两股互击式喷嘴雾化过程

图3给出了相同区域内动量比为 1.2 (大孔流量为 19.7 g/s , 小孔流量为 15.0 g/s) 的数值仿真结果与实验结果的对比图 (侧视图与正视图). 实验主要分喷嘴雾化系统和测量拍摄系统, 通过雾系统中的流量测量器控制喷嘴流量, 从而达到流量的精确控制, 采用高速摄像系统对喷嘴出口位置的雾场形态进行了有效捕捉^[18]. 从图中可以看出, 仿真所得到的液膜扩张角、破碎长度等形态参数与实验拍摄结果基本一致. 此外, 将实验和仿真计算得到的液膜横向扩张角、纵向扩张角及液膜破碎长度进行了测量, 并进行了比对, 误差分别为 21.2%, 18.7% 和 12.1%, 均小于 30%.

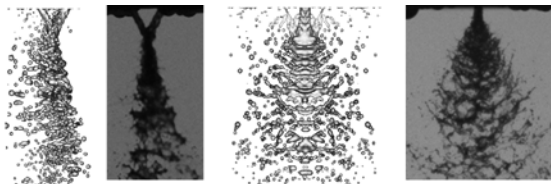


图3 液膜形态的计算结果与实验结果对比

Fig.3 Comparison of liquid sheet characteristics between the simulation results and experimental results

图4和图5分别给出了动量比为 1.0 的条件下喷嘴雾化仿真结果 (时刻 $\tau = 2.015\text{ ms}$) 的剖视图和不同 x 轴位置的液相分布图 (由于雾化场存在波动, 液膜形态稍有差别, 该图只代表这一时刻

的液膜形态). 可以看出, 液膜形态向孔径较大一侧偏离, 且呈“弧形”, 液膜上可观察到较为明显的“褶皱状”表面波. 从不同 x 位置的液相分布可以看出, 两股射流在撞击点撞击之后的液相分布主要分为 4 个区域: 射流、液膜、液丝及液滴区域(如图 5 所示). 液相分散程度沿 x 方向逐步扩散.

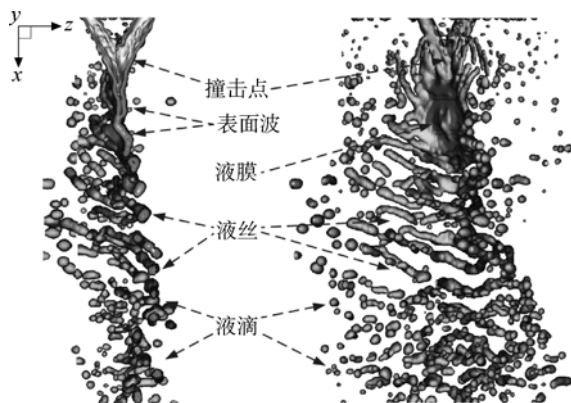


图4 液膜剖视图及侧视图

Fig. 4 Clipped view and side view of liquid sheet

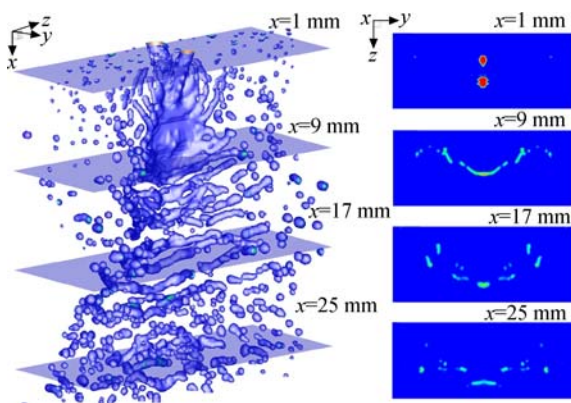


图5 不同 x 轴位置的液相分布图

Fig. 5 Liquid distribution at different x axis locations

图 6 为在 y 方向对称面位置的液相体积分数(ϕ_l)分布、速度大小分布及 z 方向速度分量的分布云图. 可以看出, 整个 y 方向对称面上的液相分布向大孔径射流方向偏移; 小孔径射流一侧的速度及 z 方向的速度分量均大于大孔径射流一侧. 而且对于不同孔径比的互击式喷嘴来说, 大孔径一侧的射流并未完全参与撞击, 中心位置的液体在撞击之后速度迅速下降, 而周围的液体则保持撞击前的速度, 因此形成了“弧形液膜”.

图 7 为喷嘴雾化过程不同时刻的液膜形态图. 可以看出, 两股射流在撞击之后液体在射流撞击动能的作用下开始逐步向 x 和 z 方向延展($\tau=0.4261$ ms), 形成的液膜为“弧形液膜”, 并伴随有

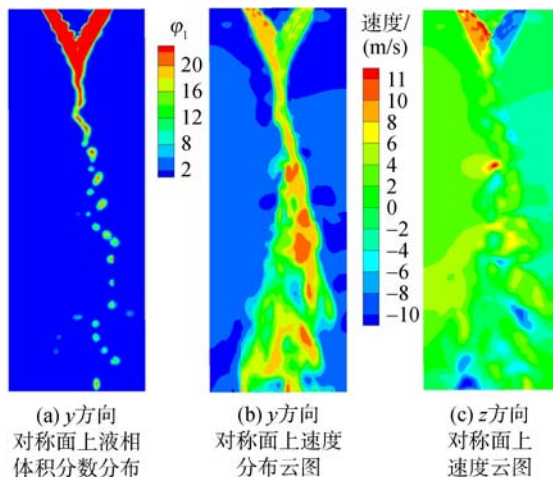


图6 y 方向对称面上的液相体积分数分布、速度分布及 z 方向速度分量分布

Fig. 6 Liquid volume fraction distribution, velocity distribution on the y direction symmetrical plane and z direction velocity distribution

表面波和少量液滴的产生($\tau=0.6396$ ms), 随后液膜在表面波和气动力的作用下破碎成连续不断的液丝, 并进一步产生大量液滴($\tau=1.595$ ms). 整个射流撞击、液膜形成、液膜破碎成液丝及最后液滴的形成过程与实验中观察到的现象一致

3.2 不同动量比对液膜形态的影响

图 8 为不同动量比条件下的两股互击式喷嘴液膜形态图. 图 9 为不同动量比条件下 y 方向对称面上的液相分布图可以看出, 两股射流动量比的增大, x 轴向位置的液相分布开始向大孔径射流一侧的偏移量变小, 当动量比达到 1.6 时, 可以看到液相分布向小孔径射流一侧偏移. 原因在于当动量比增大时, 大孔径一侧的射流速度增大, 当速度达到一定程度时, 撞击之后剩余的射流动能足以让另一侧的射流发生偏移. 从液膜的三维形态来看, 由于两股射流的孔径不同, 部分射流未参与撞击, 因此, 无论动量比如何变化, 液膜均呈现出一定的弧度. 由于射流速度的不同, 液膜特性也有所不同, 至于具体原因, 将通过动量原理对撞击点位置附近的速度的分布来进行分析.

两股射流撞击产生的合成角 β 主要由动量原理确定. 图 10 分别为不同动量比条件下线 1 和线 2 在撞击点位置(如图 1 所示)的速度大小分布. 可以看出, 随着动量比的增大, 撞击点位置右侧(大孔径一侧)的速度随之增大, 这导致左右两侧的速度差发生变化, 当在动量比 $R=1.4$ 时, 两侧的速度差达到最小, 此时所对应的两股射流的速

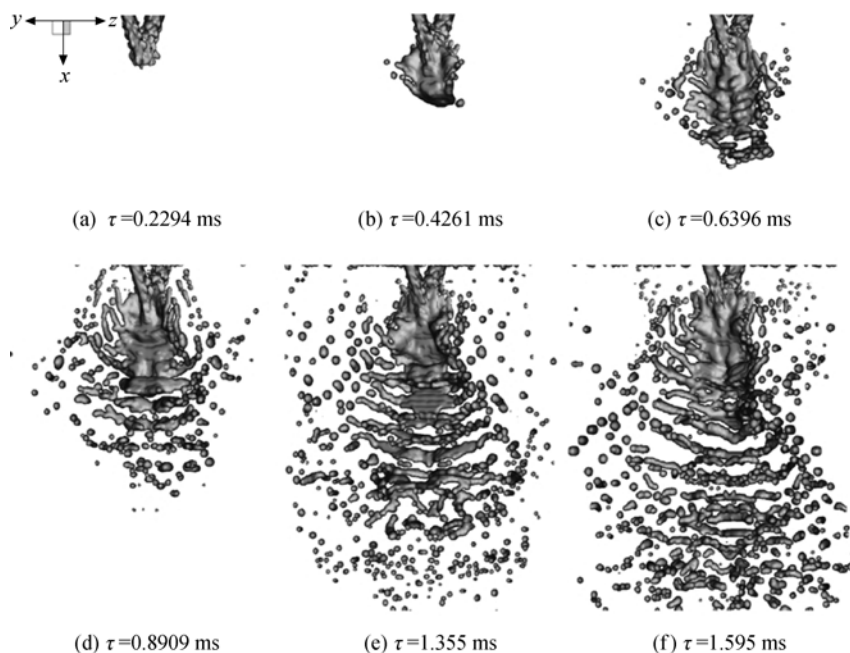


图7 不同时刻的液膜形态图

Fig. 7 Liquid sheet characteristics at different times

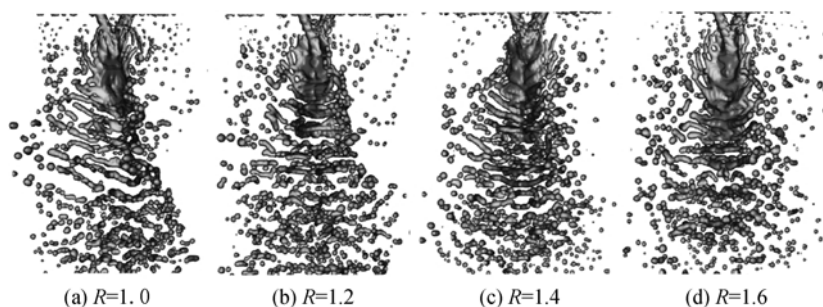


图8 不同动量比条件下的液膜形态

Fig. 8 Liquid sheet characteristics at different momentum ratios

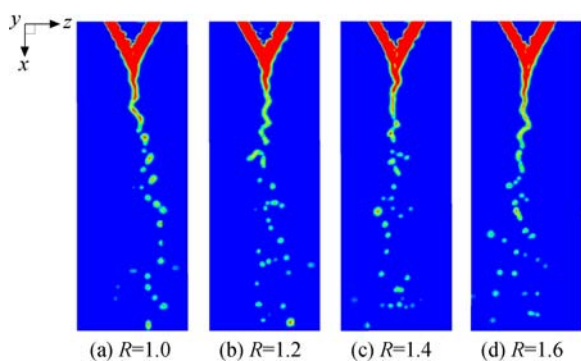


图9 不同动量比条件下 y 方向对称面上的液相分布

Fig. 9 Liquid distribution on the y direction symmetrical plan at different momentum ratios

度分别为 19.13 m/s 和 18.8639 m/s.

这也是为什么在动量比为 1.4 时液膜基本处

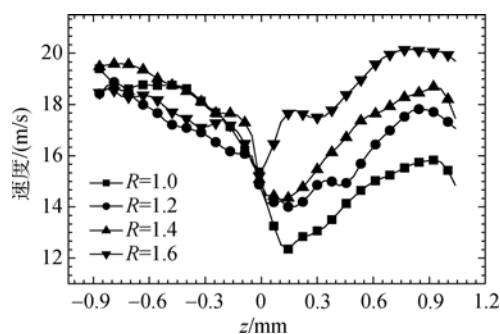


图10 撞击点位置(线1)速度大小分布

Fig. 10 Velocity distribution at impingement point (line 1)

于中心轴线位置的原因,由此可以推断:参与撞击的射流动量比对射流撞击后的合成角起着决定作用.

图11 为关于液膜合成角的仿真结果与上述

理论计算结果的对比图,仿真结果与理论结果吻合较好,误差均小于10%。其中,合成角 β 为正表示液膜向 $+z$ 方向偏移,为负表示液膜向 $-z$ 方向偏移。

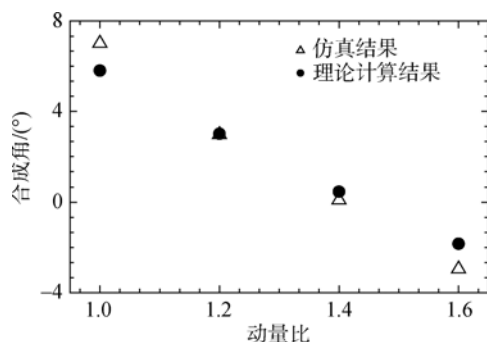


图11 合成角仿真结果与理论计算结果对比

Fig. 11 Comparison of resultant angle between the simulation results and theoretical calculation results

4 结 论

通过对两股互击式喷嘴雾化过程在不同动量比条件下的仿真,得到以下结论:

1) CLSVOF方法能对两股互击式喷嘴的雾化形态进行有效捕捉,对整个雾化过程进行详细展现,且清晰捕捉到液膜上表面波的形成及液膜的整个雾化过程,计算所得到的一些重要液膜形态参数与实验结果吻合。

2) 两股不同孔径的射流在撞击点撞击之后,液体在射流撞击动能的作用下延展形成“弧形”液膜,原因在于大孔径一侧的射流并未完全参与撞击,中心位置的液体在撞击之后速度迅速下降,而周围的液体则保持撞击前的速度。

3) 在不同动量比条件下,射流撞击后轴线位置的合成角主要取决于参与撞击射流的动量比,当两股射流动量比相等时,合成角为零。合成角的仿真结果与理论计算结果吻合较好,误差均小于10%。

参考文献:

[1] 杨 V, 安德松 W E. 液体火箭发动机燃烧不稳定性[M]. 张宝炯, 洪鑫, 陈杰, 译. 北京: 科学出版社, 2001.

[2] 石少平, 庄逢辰. 射流撞击雾化索太尔平均直径的计算[J]. 推进技术, 1995, 16(3): 22-25.

SHI Shaoping, ZHUANG Fengchen. Calculation of the Sauter mean diameter of jet-impinging atomizers[J]. Journal of Propulsion Technology, 1995, 16(3): 22-25. (in Chinese)

nese)

[3] Donald J H. Spray characterization of like-on-like doublet impinging rocket injector[R]. AIAA 91-0687, 1991.

[4] Lai W H, Wang H C. Flow patterns generated by like and unlike-doublet impinging jets[R]. AIAA-2002-3700, 2002.

[5] Li R, Nasser A. Characteristics of liquid sheet formed by two impinging jets[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(8): 1-13.

[6] 张蒙正, 张泽平. 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 Mengzheng, ZHANG Zeping. Experimental research on spray properties of unlike impinging injectors [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(1): 57-59. (in Chinese)

[7] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性实验[J]. 推进技术, 2008, 29(1): 22-24.

ZHANG Mengzheng, YANG Weidong, WANG Mei. Test of unlike impinging injector atomization characteristics with gelled water[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(1): 22-24. (in Chinese)

[8] 刘晓伟, 胡伟, 曹晶, 等. 鲁泊数和孔径比对直流互击式喷嘴性能的影响[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 24-27.

LIU Xiaowei, HU Wei, CAO Jing, et al. Effects of Rupe number and ratio of injection orifice diameter on unlike impinging injector performance[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(3): 24-27. (in Chinese)

[9] Lebas R, Menard T, Beau P A, et al. Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modeling study[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(3): 247-260.

[10] LI Qiang, OUYANG Jie, YANG Binxin, et al. Numerical simulation of gas-assisted injection molding using CLSVOF method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(5): 2264-2274.

[11] CHEN Xiaodong, MA Dongjun, Yang V. Mechanism study of impact wave in impinging jets atomization[R]. AIAA-2012-1089, 2012.

[12] Chihiro I, Toshinori W, Takehiro H. Liquid sheet dynamics and primary breakup characteristics at impingement type injector[R]. AIAA-2009-5014, 2009.

[13] Chihiro I, Toshinori W, Takehiro H. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging jets [R]. AIAA-2008-4847, 2008.

[14] 魏锦洲, 王占学. 两股互击式喷嘴雾化数值模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2009(8): 130-132.

WEI Jinzhou, WANG Zhanxue. Numerical simulation for spray characteristic of like-doublet injector[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(8): 130-132. (in Chinese)

[15] 强洪夫, 刘虎, 陈福振, 等. 基于 SPH 方法的射流撞击仿真[J]. 推进技术, 2012, 33(3): 424-429.

QIANG Hongfu, LIU Hu, CHEN Fuzhen, et al. Simulation on jet impingement based on SPH method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(3): 424-429. (in Chinese)

[16] Sussman M, Puckett E. A coupled level set and volume-of-

- fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flow [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 301-337.
- [17] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C A. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [18] 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): 73-75.
- ZHANG Mengzheng, FU Yonggui, ZHANG Zeping, et al. Spray property research and application of unlike impinging injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(2): 73-75. (in Chinese)

(编辑: 陈越)