

N_2O/C_3H_8 发动机气液同轴离心式 喷嘴喷雾性能数值模拟研究

王 栋¹, 梁国柱²

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘 要: 采用数值计算方法对氧化亚氮/丙烷 (N_2O/C_3H_8) 发动机样机气液同轴离心式喷嘴的喷雾性能进行了研究, 得到了环缝外喷嘴气相喷注压降和内喷嘴缩进深度对离心式喷嘴喷雾流场的影响。分析结果表明, 较低的气相喷注压降 (<0.3 MPa) 会显著的影响液滴在流场中的蒸发速率以及流场流强、混合比、索太尔平均直径 (SMD) 和 n 值的分布; 气相喷注压降从 0.3 MPa 增加至 0.6 MPa, 稳定喷雾流场液滴 SMD 和 n 值分别在 $2.41\sim 1.68$, $2.03\sim 0.98$ 范围内变化并逐渐减小。内喷嘴缩进深度从 0 mm 增加至 6 mm, 稳定喷雾流场液滴的 SMD 和 n 值受其影响较小, 均分别在 $1.70\sim 0.94$, $2.36\sim 0.99$ 范围内波动。喷嘴的最佳燃烧区主要分布在下游轴向位置 $0.015\sim 0.035$ m 范围内并随着气相喷注压降的升高和内喷嘴缩进深度的增大逐渐靠近喷嘴出口。该设计喷嘴在发动机热试实验中表现出很好的性能。

关键词: 离心喷嘴; 氧化亚氮/丙烷发动机; 喷雾性能研究; 流场模拟

中图分类号: V434+.13-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 02-0036-08

Numerical simulation of spray performance of coaxial swirling injector for N_2O/C_3H_8 engine

WANG Dong¹, LIANG Guo-zhu²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical computation method is conducted to investigate the spray performance of nitrous oxide/propane engine centrifugal injector. As a result, the impacts of gas injecting pressure drop and recessing distance on spray flow field of centrifugal injector were obtained. The result indicates that the lower gaseous phase injecting pressure drop (<0.3 MPa) affects the evaporation rates of propane droplet, gas flow flux, mixture ratio, and distribution of SMD and n significantly. As the gas injecting pressure increases from 0.3 MPa to 0.6 MPa, the values of SMD and n will change in the range of $2.41\sim 1.68$ and $2.03\sim 0.98$ respectively, and decrease gradually. As the recess depth of inner injector increases from 0 mm to 6 mm, the SMD and n values of droplet in the stable spray flow field

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2014-03-13

基金项目: 中国航天科技集团公司第六研究院创新基金项目(CASC201103)

作者简介: 王栋 (1983—), 男, 博士, 研究领域为姿轨控发动机系统设计

will vary slightly, which fluctuate within 1.70~0.94 and 2.36~0.99 respectively. The best combustion zone of the injector distributes mostly in the downstream position of 0.015~0.035 m, and approaches to the injector outlet gradually along with the increase of gas pressure drop and recess depth. The injector has obtained a good effect in C_3H_8/N_2O engine hot test.

Keywords: centrifugal injector; nitrous oxide/propane engine; spray performance study; flow field simulation

0 引言

选用廉价无毒、无污染、高能以及使用维护方便的氧化亚氮/丙烷 (N_2O/C_3H_8) 作为液体火箭发动机推进剂所具有的一系列显著的优点可有效地满足新一代绿色推进系统的要求。美国、欧空局和北京航空航天大学正对该型发动机的性能进行原理验证实验研究^[1-3]。

喷嘴作为液体发动机的关键部件,其性能的优劣直接影响到燃烧室的燃烧效率和发动机性能。作者选用具有喷雾粒径小,喷雾场分散性和均匀性好等诸多优点的气液同轴离心式喷嘴作为 N_2O/C_3H_8 发动机设计样机喷注器的喷注单元。由于离心喷嘴的喷雾过程包括液膜形成、液膜破碎和液滴形成,其雾化过程是一种随机过程且影响因素很多,因此一直是国内外学术界极为活跃的一个研究领域^[4-8]。近几年来,随着计算流体力学的快速发展,诸多 CFD 软件已能对喷嘴的流场特性进行较可信的数值模拟,尤其是对喷嘴液膜破碎雾化的模拟。为了获取 N_2O/C_3H_8 发动机样机离心式喷嘴的工作特性,本文采用计算流体力学的方法对该设计喷嘴在气态 N_2O 不同喷注压降和内喷嘴缩进深度工况下的液态 C_3H_8 喷雾流场开展数值模拟研究。

1 物理模型和数值计算方法

N_2O/C_3H_8 发动机气液同轴离心式喷嘴的工作设计参数: 1) 液体丙烷流量为 6.93 g/s, 其离心喷嘴出口直径为 1.64 mm, 雾化半角为 55° , 喷嘴上游压力为 2.6 MPa; 2) 气体 N_2O 的流量由上游压力控制并在 15~50 g/s 范围内调节变化, 其

环缝喷嘴的内外径分别为 5.1 mm 和 6.0 mm。根据气液同轴离心式喷嘴的物理结构和流场特性, 模拟计算一个二维轴对称气液两相湍流受限射流问题。图 1 为喷雾流场的计算区域, 图 1 中半径 r_1 和 r_2 为离心式喷嘴环缝内外径的结构设计尺寸。网格采用分块的结构网格, 对喷嘴出口以及对称轴附近的区域进行加密处理。

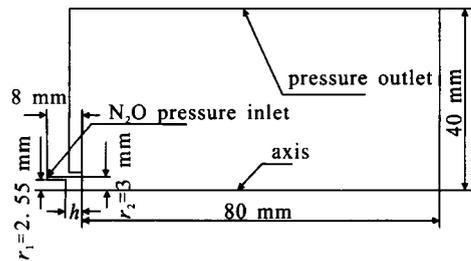


图 1 同轴离心式喷嘴喷雾流场计算区域

Fig. 1 Computational zone for spray flow field of centrifugal injector

计算区域的各边界条件设置如图 1 所示, 其中压力出口根据发动机燃烧室的设计工作压力设置为 2 MPa。计算中耦合气相与液相的相互作用, 包括动量、质量 (蒸发) 以及能量的交换。连续相的计算用求解流场控制方程的方式完成, 湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[9], 离散格式采用二阶迎风格式, 压力-速度的耦合基于协调一致求解压力耦合方程的半隐 SIMPLEC 算法, 流场初始温度为 300 K, 计算过程中忽略重力等彻体力的影响。液体丙烷喷雾液滴离散相的运动及其轨迹用拉格朗日离散相模型模拟计算^[10]。喷雾模型采用压力旋流喷嘴喷雾模型, 液滴射流数设为 20, 其下游的雾化考虑破碎、碰撞和蒸发过程, 其中破碎模型采用波动 Wave 模型中的线性不稳定雾

化模型^[1]，液滴的碰撞模型采用 O'Rourke 模型^[2]，考虑了液体碰撞反弹、聚合及摩擦分离等。两相间是作用力采用动态拽力模型。

本文分别对气液同轴离心式喷嘴在不同 N_2O 入口压力 p_{in,N_2O} 和内喷嘴不同缩进深度 h 工况下的喷雾流场进行数值模拟计算分析。为了合理有效地模拟出喷雾流场，模拟过程分两步进行：先模拟环缝喷嘴气相 N_2O 射流的稳定流动状态；然后激活压力旋流喷嘴模型，对液体丙烷的喷雾过程进行数值计算模拟。

2 计算结果与分析

2.1 喷嘴喷雾过程

以喷嘴环缝入口压力 $p_{in,N_2O}=2.4$ MPa, $p_{in,C_3H_8}=2.6$ MPa, $p_{out}=2.0$ MPa, 缩进深度 $h=4$ mm 工况下的模拟结果为例分析离心式喷嘴的喷雾过程。

图 2 为喷嘴无喷雾时流场速度分布图。 $N_2O(g)$ 以 164 m/s 的速度从环缝通道中喷出，后带动周围气体随之流动，但由于对称轴附近的气体得不到及时补充，导致该区域内的静压减小，形成的压差使得环缝喷出 N_2O 气流向对称轴偏转并汇成一股射流向下游流动。在这一过程中，射流速度在流动过程中逐渐减小，同时在喷嘴出口处形成一涡流，涡心靠近环缝喷嘴外壁面，如图 3 所示。流场稳定后环缝喷嘴的 $N_2O(g)$ 流量为 42.62 g/s。



图 2 喷嘴无喷雾时流场速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of flow field as injector does not spray

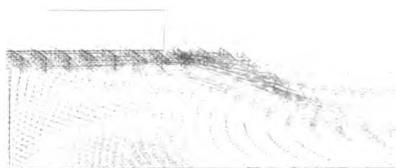


图 3 喷嘴无喷雾时缩进段速度矢量分布

Fig. 3 Velocity vector at recess section as injector does not spray

图 4 为无喷雾时流场不同轴向位置处轴向速度的径向分布。从图 4 中可以看到，离喷嘴出口 $x=0.009$ m 处径向方向的轴向速度分布范围最窄，变化最大，回流区的反向速度高达 60 m/s，后随着轴向位置的增加轴向速度的径向分布逐渐变得平缓，且速度峰逐渐逼近对称轴 ($r=0$ mm)，这是由于 $N_2O(g)$ 射流不断向侧面扩散流动的结果，且在 $x=0.025$ m 处已逐渐汇成同一股气流继续向下游流动。

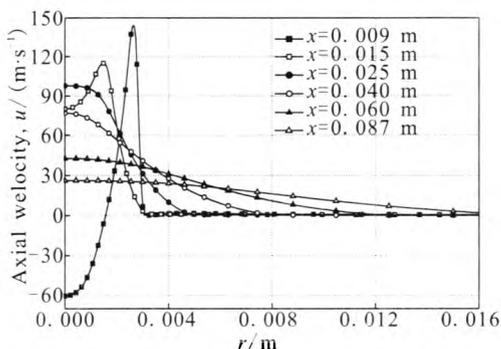


图 4 无喷雾时流场不同轴向位置处轴向速度的径向分布

Fig. 4 Radial distribution of axial velocity at different axial location of flow field without spray

在气相流场稳定后激活离散相模型模拟计算液体丙烷旋流喷嘴的喷雾过程。图 5 为不同时刻流场液滴颗粒的分布。图 6 为不同时刻流场喷雾液滴的算术平均直径 d_{10} 、表面积平均直径 d_{20} 、体积平均直径 d_{30} 以及索太尔平均直径 (SMD) d_{32} 。从图 6 中可知，丙烷液滴从压力旋流喷嘴流出后，由于在喷嘴出口处存在 $N_2O(g)$ 涡流，且液滴的出流流量 (6.93 g/s) 和速度均相对较小，无法克服涡流作用，故丙烷液滴射流先随着涡流流向环缝喷嘴，后在 $N_2O(g)$ 高速射流的带动下向下游流动，并在其气动力作用下破碎雾化最后全部蒸发。喷雾流场在 6 ms 左右逐渐趋于稳定，液滴 SMD 在 1.2 μm 附近波动。喷雾过程中环缝喷嘴出口处由于受到丙烷液滴的影响， $N_2O(g)$ 流量在 41.10~41.45 g/s 范围内波动，其均值 41.275 g/s 相对于无喷雾时环缝喷嘴的流量 42.62 g/s 减小 3.16%。

图 7 为喷雾 10 ms 时流场不同轴向位置上轴速度的径向分布。与图 4 比较可知，由于丙烷

液滴射流的作用, 流场连续相的速度流场也受到影响, 同一轴向位置上的轴向流速的径向分布有较大的变化, 尤其在离对称轴 3 mm 径向距离内, 且越靠近喷嘴影响越大, 其中对回流区的影响最为显著。总体上液滴射流使得对称轴附近的流场

流速变小、分布变平滑, 此外在轴向位置 $x=0.015$ m 处的轴向速度在其径向分布上多形成了一个波峰, 但在 $x=0.025$ m 处该波峰已逐渐削弱变得平滑。由此可见, 喷雾射流对流场的流型影响还是很大的。

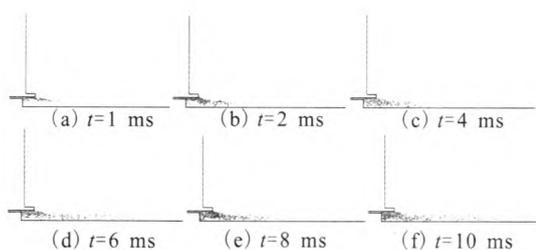


图 5 不同时刻流场液滴颗粒的分布

Fig. 5 Droplet distribution of $C_3H_8(l)$ at different time

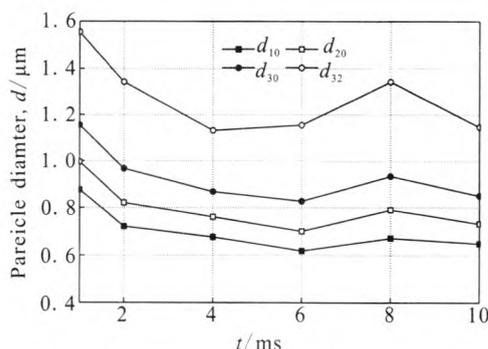


图 6 不同时刻流场喷雾液滴的粒径分布

Fig. 6 Statistic diameter of C_3H_8 droplet at different time

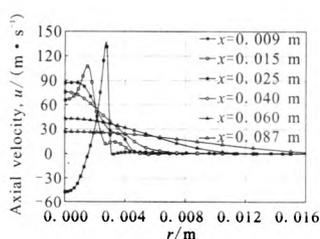


图 7 流场不同轴向位置上轴向速度的径向分布(10 ms)

Fig. 7 Radial distribution of axial velocity when sprays at 10 ms

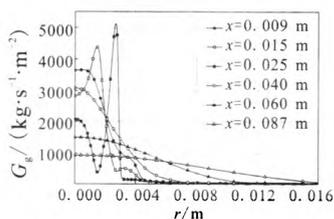


图 8 流场不同轴向位置上气相流强的径向分布(10 ms)

Fig. 8 Radial distribution of gas flow flux when sprays at 10 ms

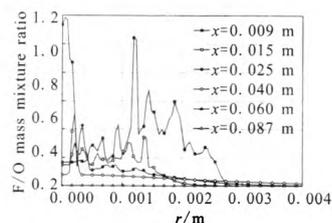


图 9 流场不同轴向位置上的 F/O 质量混合比(10 ms)

Fig.9 Radial distribution of F/O mass mixture ratio when sprays at 10 ms

图 8 为喷雾流场在喷雾 10 ms 时在不同轴向位置上气相流强的径向分布, 其中气相包括气态 N_2O 和气态 C_3H_8 , 流场的流强由气相的密度与速度相乘求得。流场的分布与轴向速度的分布趋势基本一致。由于计算流强所用的速度为标量, 所以在 $x=0.009$ m 轴向位置上回流区的流强数值也为正值。图 9 为喷雾 10 ms 时流场的 F/O 质量混合比, 其中 F 代表燃料, 包括蒸发的气态丙烷和丙烷液滴; O 表示氧化剂, 气态氧化亚氮。在喷嘴出口由于回流区的作用, 该处附近的丙烷液滴被 N_2O 射流带动一起运动, 故在 $x=0.009$ m 处在径向位置 $r=(0.0012, 0.0027)$ m 范围内相对于其它轴向位置的 F/O 比分布较高, 后 N_2O 射流向对

称轴靠拢聚合, 同时带动丙烷液滴流动雾化蒸发, F/O 比分布也逐渐变得均匀平缓。由于丙烷与氧化亚氮燃烧的化学反应质量当量比为 0.1, 根据图 9 中的 F/O 比分布可知喷嘴下游的燃烧高温区应出现在轴向位置 $x=(0.015, 0.040)$ m 范围内。

2.2 气相喷注压降对喷雾流场的影响

为分析环缝喷嘴 $N_2O(g)$ 喷注压降对喷雾流场的影响, 分别对 $p_{inN_2O}=2.1$ MPa, 2.2 MPa, 2.3 MPa, 24 MPa, 25 MPa, 26 MPa, $p_{inC_3H_8}=26$ MPa, $h=0$ mm, $p_{out}=2.0$ MPa 共 6 种工况下的氧化亚氮/丙烷气液同轴离心式喷嘴的喷雾流场进行了数值模拟。

图 10 为不同压降下无喷雾时环缝喷嘴的出

口速度以及喷雾前后 $N_2O(g)$ 流量模拟值和理论计算值的变化。其中喷雾时的模拟流量取喷雾前 10 ms 的平均值。随着压降的升高，环缝喷嘴出口速度越来越大，但增大的趋势逐渐变缓，且 0.6 MPa 压降下的出口速度为 191 m/s，尚未达到当地声速（理论上环缝喷嘴出口处达到当地声速的条件是喷嘴上下游压比应不低于 1.82）。无喷雾时环缝喷嘴的模拟流量略大于理论计算值，两者的数值误差范围在 4.4%~8.6%。喷雾时由于液体丙烷液滴射流的影响，环缝喷嘴的流量有些微小的波动，其均值基本与无喷雾时的流量一致。

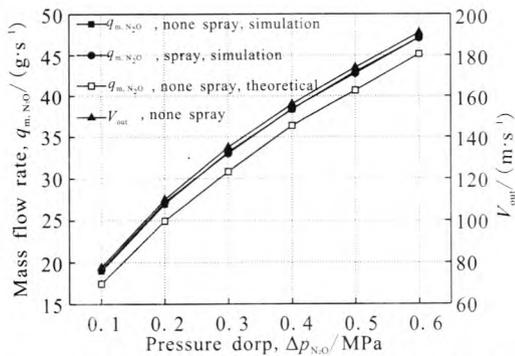


图 10 不同压降下无喷雾时环缝喷嘴的出口速度及流量
 Fig. 10 Outlet velocity(without spray) and mass flow rate of annular injector at different pressure drop

图 11 为不同压降下喷雾流场在 10 ms 时刻的喷雾液滴分布。从图 11 中可以很明显看出 $N_2O(g)$ 喷注压降对喷雾流场液滴分布的影响。当压降较低时 (<0.3 MPa)，流场中环缝喷嘴的气流喷射速度也较低，使得液体丙烷液滴的蒸发速率不是很高，最终液滴在所模拟的流场区域中来不及完全蒸发就流出流场。随着压降的升高和气流速度的显著增大使得液滴的蒸发速度加快，在流出流场前就已经完全蒸发为气体丙烷，这将有

利于与气体 N_2O 的混合、点火以及燃烧。

图 12 和图 13 分别为不同喷注压降下喷雾流场 10 ms 时在轴向位置 $x=0.009, 0.015, 0.035$ m 处气相流强和 F/O 比的径向分布。从图中可看出不同轴向位置的气相流强的径向分布具有显著的不同，靠近喷嘴处由于回流区的存在， $x=0.009$ m 处的流强呈双峰分布，随着轴向位置的增加，对应的流强分布的峰值逐渐变得小而平滑且向对称轴 ($r=0$ m) 移动。随着 $N_2O(g)$ 的喷注压降提高，流场同一轴向位置的气相流强逐渐增大，且主要体现在峰值附近，但增加量在逐渐减小。F/O 比的分布综合表现了喷雾时两者流强的分布规律。同一喷注压降下的喷雾流场靠近喷注面的 F/O 比最大且主要集中并较均匀地分布在该处的回流区(如图 13(a)中所示)，随着轴向位置的增大，F/O 比分布逐渐减小，同时其径向分布区域也逐渐增大。随着 $N_2O(g)$ 喷注压降的提高，由于 $N_2O(g)$ 流量的增加，流场同一轴向位置的 F/O 比逐渐减小，最佳化学反应当量比 ($F/O=0.1$) 的分布区域主要在轴向位置的 0.015~0.035 m 区间内并逐渐靠近喷嘴。

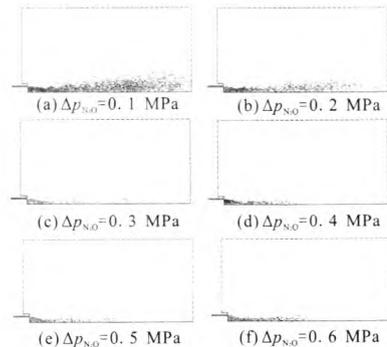


图 11 不同压降下喷雾流场液滴分布(10 ms)
 Fig. 11 Droplet distribution in spray flow field at different pressure drop

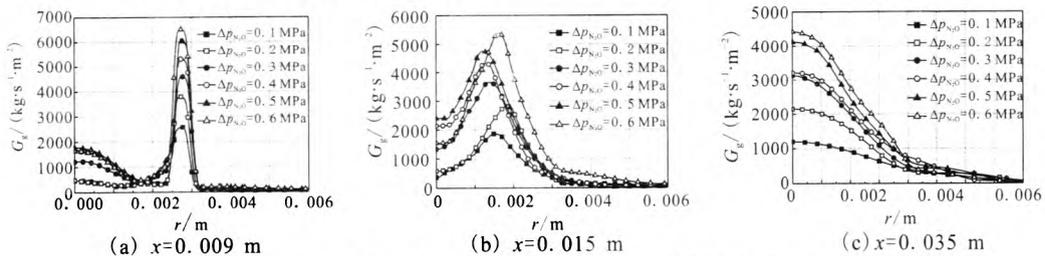


图 12 不同喷注压降下不同轴向位置气相流强的径向分布
 Fig. 12 Radial distribution of gas flow flux at different axial location at different pressure drop

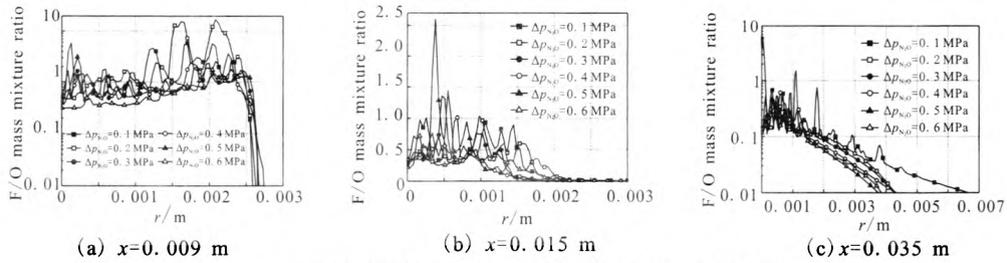


图 13 不同喷注压降下不同轴向位置 F/O 比的径向分布

Fig. 13 Radial distribution of F/O mass mixture ratio at different axial location at different pressure drop

图 14 和图 15 分别为不同 N₂O 喷注压降下喷雾流场丙烷液滴索太尔直径 SMD 及其 R-R 分布指数 *n* 随喷雾时间的变化。

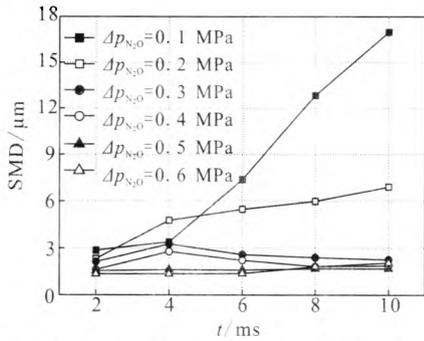


图 14 不同喷注压降下喷雾流场液滴的 SMD

Fig. 14 SMD of C₃H₈ droplet at different pressure drop

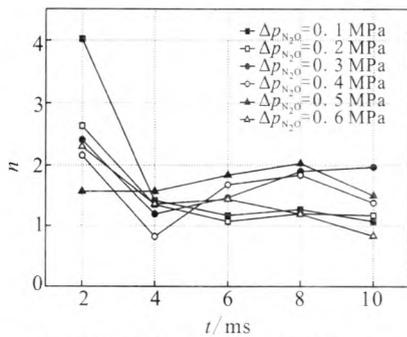


图 15 不同喷注压降下喷雾流场液滴的 R-R 指数

Fig. 15 R-R distribution index of C₃H₈ droplet at different pressure drop

整体上 SMD 值和 *n* 值随压降的增加而降低, 但两者的降低量随时间的变化趋势相反: 各喷注压降在喷雾刚开始时 (*t*=2 ms), 流场 SMD 值相近 (1.35~2.86), *n* 值的变化范围较大 (1.57~4.02); *t*=10 ms 时各喷注压降的喷雾流场已逐渐趋于稳定, 对应的 SMD 值相差较大 (1.68~

16.99), 但 *n* 值的比较相近 (0.83~1.97)。从图 14 中还可以发现 $p_{in,N_2O} \leq 0.2$ MPa 时喷雾流场 SMD 值随时间增加而增大, 与 $p_{in,N_2O} \geq 0.3$ MPa 时的变化趋势相反, 尤其在 10 ms 的 SMD 值明显偏大, 这是由于丙烷液滴在流出计算域时未完全蒸发所致。喷注压降从 0.3 MPa 增加到 0.6 MPa, 喷雾流场均在 8 ms 时刻就已趋于稳定, 此后到 10 ms 流场液滴的 SMD 和 *n* 值分别在 2.41~1.68 和 2.03~0.83 范围内波动, 变化范围比较相近。

2.3 缩进深度对喷雾流场的影响

为了分析旋流内喷嘴的缩进深度 *H* 对喷雾流场的影响, 分别对 $p_{in,N_2O}=2.4$ MPa, $p_{in,C_3H_8}=2.6$ MPa, $h=0$ mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, $p_{out}=2.0$ MPa 共 7 种工况下的喷嘴喷雾流场进行数值模拟。

图 16 为不同缩进深度 *h* 的环缝喷嘴无喷雾时的出口速度及喷雾前后 N₂O(g) 模拟流量值的变化, 其中喷雾时的流量取喷雾前 10 ms 的平均值。从图中可以看出, 环缝喷嘴的出口速度随着缩进深度 *h* 的增加而缓慢增大, 从 156 m/s 增加至 169 m/s, 增加量为 8.3%, 这是由于 *h* 的增加使得环缝喷嘴的通道长度变短从而其对流经气体 N₂O 的流阻影响也变小。出口速度逐渐升高的同时, 喷嘴流量也会随之有所升高。当加入液滴喷射模型后, 由于丙烷液滴对环缝喷嘴出口流动的影响, 使 N₂O (g) 的流量相对无喷雾时有所减小, 但减小量均不超过无喷雾时流量的 5%。环缝喷嘴出口气流速度和流量的增大在一定程度上提高了旋流喷嘴的气液喷射速度比和动量比, 这有利于气液两相的雾化、混合, 从而提高燃烧效率。

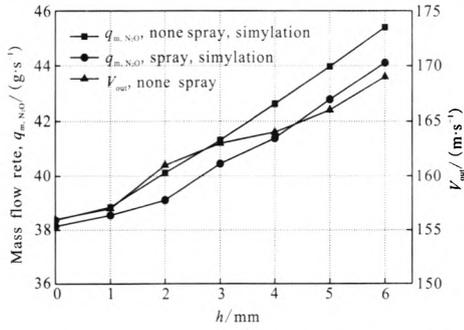


图 16 不同缩进深度环缝喷嘴无喷雾时的出口速度及流量

Fig. 16 Outlet velocity(without spray) and mass flow rate of annular injector at different recess distances

10 ms 时在轴向位置 $x=0.009, 0.015, 0.035$ m 处气相流强和 F/O 比的径向分布。从图中可看出, 随着缩进量增加, 流场同一轴向位置的气相流强峰值逐渐减小并有逐渐远离对称轴的趋势 (如 $x=0.015$ m 处), 且其附近流量的分布也变得平缓。缩进深度对 F/O 混合比的影响也比较明显, 随着缩进量的增加, 各轴向位置的混合比分布值逐渐变小的同时其径向分布范围逐渐扩大。在 $x=0.009$ m 处由于回流区的存在, 该处混合比均匀地集中分布在径向位置 $r=(0\sim 0.0026)$ m 范围内。图中喷嘴下游最佳燃烧混合比的分布区域主要集中在 $x=0.015\sim 0.035$ m 轴向范围内, 其同时也表明缩进深度的增加会使该区域逐渐靠近喷注面。

图 17 和图 18 分别为不同缩进深度喷雾流场

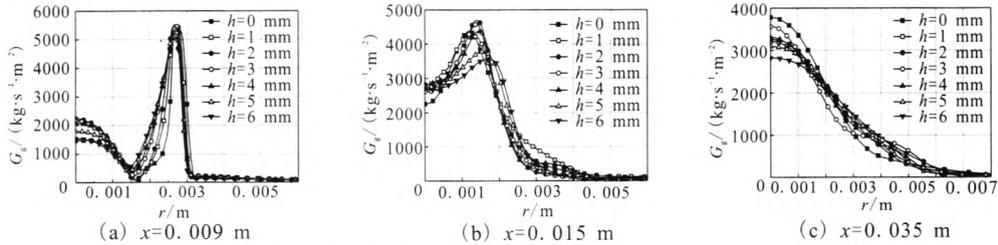


图 17 不同缩进深度喷雾流场不同轴向位置气相流向的径向分布(10 ms)

Fig. 17 Radial distribution of gas flow flux at different axial location of spray flow field at different recess depth

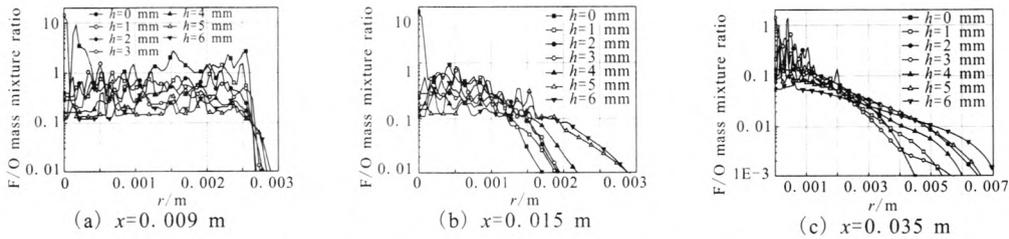


图 18 不同缩进深度喷雾流场不同轴向位置 F/O 比的径向分布(10 ms)

Fig. 18 Radial distribution of F/O mass mixture ratio at different axial location of spray flow field at different recess depth

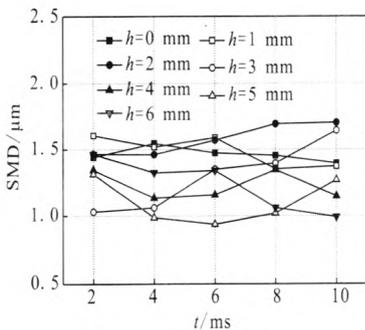


图 19 不同缩进深度下喷雾流场液滴 SMD
Fig. 19 SMD of C_3H_8 droplet at different recess depth

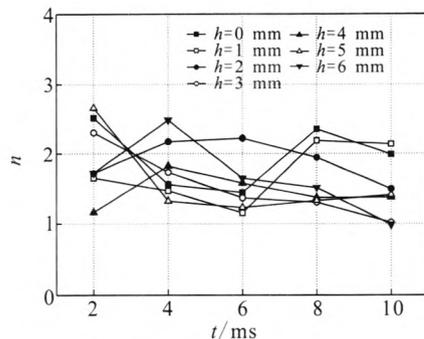


图 20 不同缩进深度下喷雾流场液滴 R-R 分布指数
Fig. 20 R-R distribution index of C_3H_8 droplet at different recess depth

图 19 和图 20 分别为不同缩进深度下喷雾流场丙烷液滴索太尔直径 SMD 及其 R-R 分布指数随喷雾时间的变化。可以看出缩进深度对喷雾流场的液滴分布、SMD 以及 n 值的影响较小, 在喷雾流场稳定的 6~10 ms 范围内的 SMD 和 n 值均分别在 0.94~1.70 和 0.99~2.36 区间内波动变化。整体上喷雾流场随着缩进深度的增加其液滴 SMD 和 n 值有逐渐减小的趋势。

图 21 为 N_2O/C_3H_8 发动机样机的喷注器和实验照片, 其中喷注器由 6 个气液同轴离心式喷嘴组成。实验中发动机能可靠地被点火器点燃, 这从一定程度上验证了所设计的喷嘴具有良好的雾化混合效果。

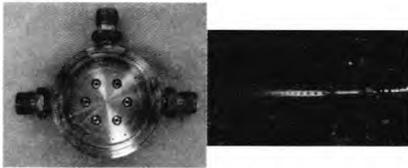


图 21 N_2O/C_3H_8 发动机喷注器和试车照片

Fig. 21 Injector and picture taken in experiment of N_2O/C_3H_8 engine

3 结论

1) 拉格朗日离散相模型能较好的模拟氧化亚氮/丙烷气液同轴离心式喷嘴喷雾流场的喷雾过程, 包括丙烷液滴的破碎、碰撞聚合和蒸发。

2) 不同气相喷注压降下的环缝在喷雾前后的流量基本一致, 与理论计算值有 4.4%~8.6% 的误差; 较低的气相喷注压降 (<0.3 MPa) 对液滴的蒸发速率影响较小, 从而影响喷雾流场的流强、F/O 比、SMD 和 n 值的分布。气相喷注压降从 0.3 MPa 增加至 0.6 MPa, 稳定喷雾流场的液滴 SMD 和 n 值分别在 2.41~1.68 和 2.03~0.98 范围内波动变化并逐渐减小, 这将有利于提高发动机的燃烧效率。

3) 内喷嘴缩进深度从 0 mm 增加至 6 mm, 环缝喷嘴的气相出口速度增加 8.3%; 其流量在喷雾后均有不超过 5% 的减小; 流场同一轴向位置的气相流强和 F/O 比径向分布有所减小且变得平缓; 喷雾流场液滴的 SMD 和 n 值均分别在 0.94~1.70 和 0.99~2.36 区间内波动, 受缩进深度影响较小。

这将为发动机离心喷嘴的结构设计提供参考。

4) 在设计工况下的最佳燃烧区主要集中在下游轴向位置 0.015~0.035 m 范围内并随着气相喷注压降的升高和内喷嘴缩进深度的增大逐渐靠近喷嘴出口。

参考文献:

- [1] SMITH N W H, MOSER M D. Nitrous oxide/propane rocket test results, AIAA 2000-3222[R]. USA: NASA, 2000.
- [2] TILIAKOS N, TYLL J, HERDY R, et al. Development and testing of a nitrous oxide/propane rocket engine, AIAA 2001-3258[R]. USA: NASA, 2001.
- [3] VALENTIAN D, SOUCHIER A. Green propellant implementation for space missions and upper stage propulsion, AIAA 2007-5483[R]. USA: AIAA, 2007.
- [4] FERRENBURG A, HUNT K, DUESHERG I. Atomization and mixing study NASA-CR-17851[R]. USA: NASA, 1985.
- [5] DUMOUCHEL C, BLOOR M I G, DOMBROWSKI N, et al. Viscous flow in a swirl atomizer[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(1): 81-87.
- [6] KOO J Y, MARTIN J K. Droplet sizes and velocities in a transient diesel fuel spray[R]. USA: SAE, 1990.
- [7] SANKAR S V, BRENADELA R A, LSAKOVIC A, et al. Liquid atomization by coaxial rocket injectors, AIAA 91-0691[R]. USA: AIAA, 1991.
- [8] CHINN J J. An appraisal of swirl atomizer inviscid flow analysis[J]. Atomization and Sprays, 2009, 19(3): 283-308.
- [9] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [10] 王福军. 计算流体力学分析 -CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] LIU A B, MATHER D, TEITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays, SAE 93-0072 [R]. USA: SAE, 1993.
- [12] O'ROURKE P J. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays[D]. Princeton, NJ: Princeton University, 1981.

(编辑: 张永秀)