

# 工质粘性对两股射流撞击雾化特性影响试验研究

李佳楠, 费 俊, 周立新, 杨伟东

(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)

**摘 要:** 为揭示工质粘性对两股射流撞击雾化特性的影响规律, 在大气开放环境下开展了不同粘度系数工质的射流撞击雾化试验。由相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 测量了撞击点下游 10 mm, 20 mm, 30 mm 与 40 mm 平面位置处液滴的粒径分布和速度分布等信息。试验结果表明: 粘度系数增大, 雾场某点处的液滴粒径有增大的趋势, 运动速度有减小的趋势; 雾场液滴粒径达到平衡状态时与撞击点的距离将会增加; 撞击点下游某一平面的液滴平均运动速度将会减小; 当粘度系数一定时, 距离撞击点越远, 该平面的液滴平均运动速度越小。

**关键词:** 射流撞击; 雾化特性; 粘度系数; SMD; 运动速度

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 02-0043-05

## Experimental study of effect of working fluid viscosity on atomization characteristics of a pair of impinging jets

LI Jia-nan, FEI-Jun, ZHOU Li-xin, YANG Wei-dong

(Key Laboratory for Liquid Rocket Engine Technology

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

**Abstract:** In order to investigate effect of working fluid viscosity on atomization characteristics of a pair of impinging jets, the atomization experiment of impinging jets of working fluid with various viscosity coefficient was carried out under the condition of open atmosphere. The information of size distribution and velocity distribution of droplets on 10 mm, 20 mm, 30 mm and 40 mm planes at downstream of impinging point was measured with PDPA. The experimental results reveal that the size of droplets at a position of atomization field has the increasing trend and the kinematic velocity has decreasing trend as viscosity coefficient increases, the distance from the impinging point grows while the size of droplets in the atomization field reaches balance, the mean velocity of droplets on a certain plane in downstream of impinging point decreases when viscosity coefficient increases, and under constant viscosity coefficient, the mean velocity of droplets on the plane decreases with the increase of distance from impinging point.

**Keywords:** jet impinging; atomization characteristic; viscosity coefficient; SMD; kinematic velocity

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 国家重大基础研究项目(613193)

作者简介: 李佳楠 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧

## 0 引言

在液体火箭发动机的喷雾燃烧过程中,雾化是将液体推进剂破碎成小液滴的过程。雾化过程对发动机的燃烧效率和燃烧稳定性有重大影响,研究推进剂雾化机理和喷注单元的雾化特性对发动机设计具有重要意义<sup>[1]</sup>。雾化是在一定的喷注压力下由喷注器来实现,直流互击式喷注单元是使用可贮存推进剂或液体烃类燃料的火箭发动机优选的喷注器结构<sup>[2]</sup>。其工作原理是借助两股射流的相互撞击完成雾化混合过程,具有结构简单、响应快、能迅速混合和燃烧等优点,在各种推力量级的液体火箭发动机中均有广泛的应用。液体射流的破碎与混合状态可由下列参数控制:射流撞击角度、喷射速度、喷射孔径比、喷射动量比、流体物理性质(粘度、表面张力、密度)以及喷注器工作的外界压力等等。

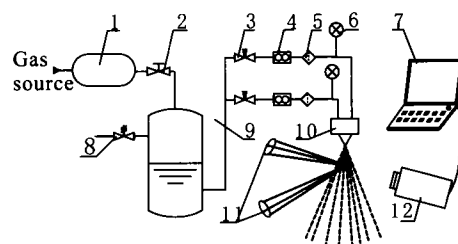
针对直流互击式喷注单元,试验研究一直是主要的研究手段。国内外研究机构开展了大量的试验研究工作。Rupe 在喷气推进实验室首次对射流撞击雾化混合进行了全面的试验研究,定义了混合效率因子,提出了 Rupe 准则。他认为两股射流的动量比与孔径比乘积为 1 时可获得最佳的撞击混合状态<sup>[3]</sup>。Dombrowski 等试验探究了影响液膜破碎的因素,研究结果表明当 Weber 数高于某一特定值时会形成撞击波,撞击波的形成与雷诺数无关<sup>[4]</sup>。Heiderman 等对射流撞击进行了广泛的研究,采用各种甘油溶液、烃类溶液与水研究了粘性与表面张力的影响,并通过改变射流速度获得了 4 种不同的雾化模式:封闭液缘,周期性掉落,开放液缘以及完全发展模式<sup>[5]</sup>。Lai 等试验研究了流体物理性质改变对雾化特性的影响,通过改变射流速度获得了 10 种不同的液膜形态,并分析了流体物性对于液膜长宽比以及液滴 SMD 的影响<sup>[6]</sup>。Yuan Tony 等配制了与 NTO/MMH 物性参数差别不大的模拟液,由 PLIF 测量了撞击点下游某一截面的混合比分布<sup>[7]</sup>。张蒙正等采用激光全息及图像处理技术,研究了两股互击式喷嘴的撞击状况及雾化性能,提出了由水试雾化性能进行喷嘴的筛选<sup>[8]</sup>。刘晓伟等研究了 Rupe 数与孔

径比对直流互击式喷注器性能的影响。研究表明:兼顾 Rupe 数与孔径比才能使氧化剂和燃料达到最佳的混合效果,提高燃烧效率<sup>[9]</sup>。

以往针对直流互击式喷注单元的试验研究中多是关注结构参数、工作参数对雾化特性的影响,关注工质物性对雾化特性的影响则较少。而工质的物性参数对雾化特性的影响较大,弄清各物性参数对雾化特性的影响规律对于精确的预测实际推进剂的雾化特性是大有帮助的。本文旨在探究粘度系数对两股射流撞击雾化特性的影响规律。通过配制一系列不同浓度的蔗糖溶液实现了粘度系数的连续变化。选取加工精度较高的直流互击式喷注单元,挑选典型工况,在大气开放环境下进行了两股射流撞击雾化试验。测量了不同粘度系数工质雾化后液滴的粒径及运动速度,分析了粘度系数对液滴粒径及液滴运动速度的影响规律。

## 1 试验系统及工质的配制

试验系统构成示意图如图 1 所示,主要由气体贮箱、液体贮箱、质量流量计、压力传感器、直流互击式喷注单元和 PDPA 光学测试系统等部件构成。液体贮箱内装有试验所用的工质,工质经气体贮箱内的气体加压后分为两路,分别流经质量流量计供应给直流互击式喷注单元的两股射流。由质量流量计对两股射流的流量分别进行调节。经加压喷射的两股射流在大气开放环境下相互撞击完成雾化过程,由 PDPA 光学测试系统对喷雾流场中液滴的粒径以及运动速度进行测量。



1-气体贮箱; 2-手动阀; 3-锥阀; 4-流量计; 5-过滤器;  
6-压力传感器; 7-计算机; 8-安全阀; 9-液体贮箱;  
10-试验喷嘴; 11-激光器; 12-PDPA 接收器

图 1 试验系统构成示意图

Fig. 1 Schematic of makeup of experiment system

两股射流撞击形成液膜的示意图如图 2 所示。以撞击点为原点, 建立如图所示的坐标系:  $Y$  轴位于液膜所在平面,  $X$  轴垂直于液膜,  $Z$  轴方向竖直向下。为了清楚地描述整个物理过程, 需要定义参数有射流速度  $V_0$ 、射流直径  $2R$ 、撞击夹角  $2\theta$  和射流长度  $L$  等参数。为描述液膜的几何结构, 需要定义参数有液膜上任一点处的动径  $r$ 、方位角  $\phi$  与液膜厚度  $h$ 。

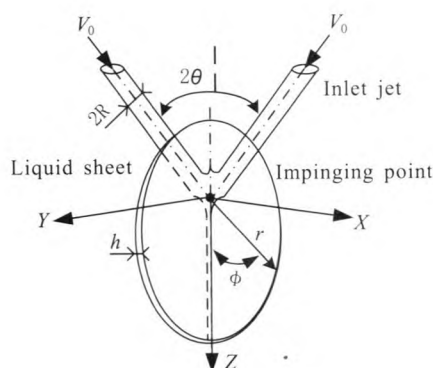


图 2 液膜形成示意图

Fig. 2 Schematic of liquid film formation

雾化之后由 PDPA 系统对雾场进行测量。PDPA 系统由发射光路系统, 接收光路系统, 信号处理系统, 位移系统以及计算机及应用软件等部件构成。首先由激光器产生激光束, 激光经发射探头照射喷雾流场, 再由接收探头接收经过喷雾流场的激光。PDPA 根据测得的信号频率来测量速度, 根据测量光线通过球形透明粒子所产生的光散射信号的相位来测量粒径<sup>[10]</sup>。由 PDPA 测量撞击点以下 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm 处的液滴粒径及运动速度。每个测量平面以平面中心为圆点, 以 3 mm 为半径转圈测量, 每一圈每隔 45° 设置一个测点。每个测点处的采样点数目为 5 000, 设定测量时间为 20 s, 当测量满足二者之一时测量终止。PDPA 粒径的测量范围为 0~248.9  $\mu\text{m}$ 。

试验采用的试验件如图 3 所示。在成一定角度 (撞击夹角) 的两个斜面上加工两个孔作为撞击孔, 工质流经该通道后相互撞击完成雾化过程。试验件的撞击孔直径为 1 mm, 孔径比为 1,

撞击夹角为 70°, 液体射流长度为 6 mm。

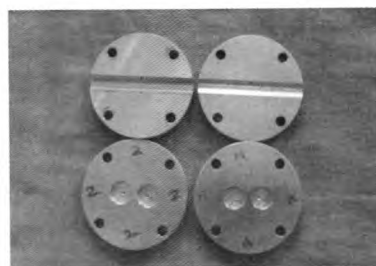


图 3 试验件

Fig. 3 Experimental samples

试验需要配制粘度系数连续变化的溶液作为试验工质。通过在水中加入蔗糖改变水的粘性, 通过控制溶液的浓度实现粘性的连续变化。试验总共配制了 5 种不同浓度的蔗糖溶液, 蔗糖的质量分数依次为 10%, 20%, 30%, 40% 与 50%。由量筒配合天平测量溶液的密度。由铂金板表面张力仪测量溶液的表面张力系数。由锥板式粘度仪测量溶液的粘度系数。测量得到的不同质量分数蔗糖溶液的密度、粘度系数以及表面张力系数值如表 1 所示。质量分数 10% 与 20% 的工质是在同一时间配制完成, 质量分数 30%、40% 与 50% 的工质试验是在另外的时间配制完成。对于粘度系数而言, 蔗糖的加入是影响其变化的主要原因; 而对于表面张力系数而言, 蔗糖的加入对其不会有太大影响, 而温度的影响便显现出来。由于工质是分两批配制完成, 故质量分数 20% 与 30% 的工质的表面张力系数之间便存在间断。

表 1 还列出了相邻两浓度蔗糖溶液间密度、表面张力系数以及粘度系数的相对变化量。由表中数据可以看出粘度系数的相对变化量远远大于密度以及表面张力系数的相对变化量。这表明不同浓度蔗糖溶液物性参数的主要差别在于粘度系数的不同, 而密度与表面张力系数的差别不大。认为粘度系数的差异是造成不同工质雾化特性参数差异的主要原因。设定单路射流的质量流量为 20 g/s, 两股射流的动量比为 1。以不同粘度系数的溶液为工质, 在大气开放环境下进行直流互击式喷注单元的射流撞击雾化试验。

表 1 蔗糖溶液物性参数表  
Tab. 1 Physical parameters of sucrose solution

质量分数/%	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	密度相对变化量	表面张力系数/( $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	表面张力系数相对变化量	粘度系数/( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	粘度系数相对变化量
10	1 000		59.66		1.71	
20	1 069	6.9	61.01	2.26	2.36	38
30	1 088	1.78	54.01	12.96	4.12	74.58
40	1 144	5.15	57.82	7.05	4.12	352.43
50	1 176	2.8	60.01	3.79	22.30	19.64

2 试验结果及分析

2.1 粒径分布特性分析

液滴的索泰尔平均直径 SMD (Sauter Mean Diameter) 可以用来反映液雾燃烧性能的好坏,是燃烧流场中常用的性能评价指标<sup>[1]</sup>。重点对喷

雾流场中的索泰尔平均直径及其分布情况进行了统计。图 4(a)~(d)分别给出了距离撞击点下游 10 mm, 20 mm, 30 mm 与 40 mm 处沿 Y 轴方向 SMD 的变化规律。对比相同高度同一位置不同工质雾化后的 SMD 可以看出,随着粘度系数的增大,液滴的 SMD 有增大的趋势。

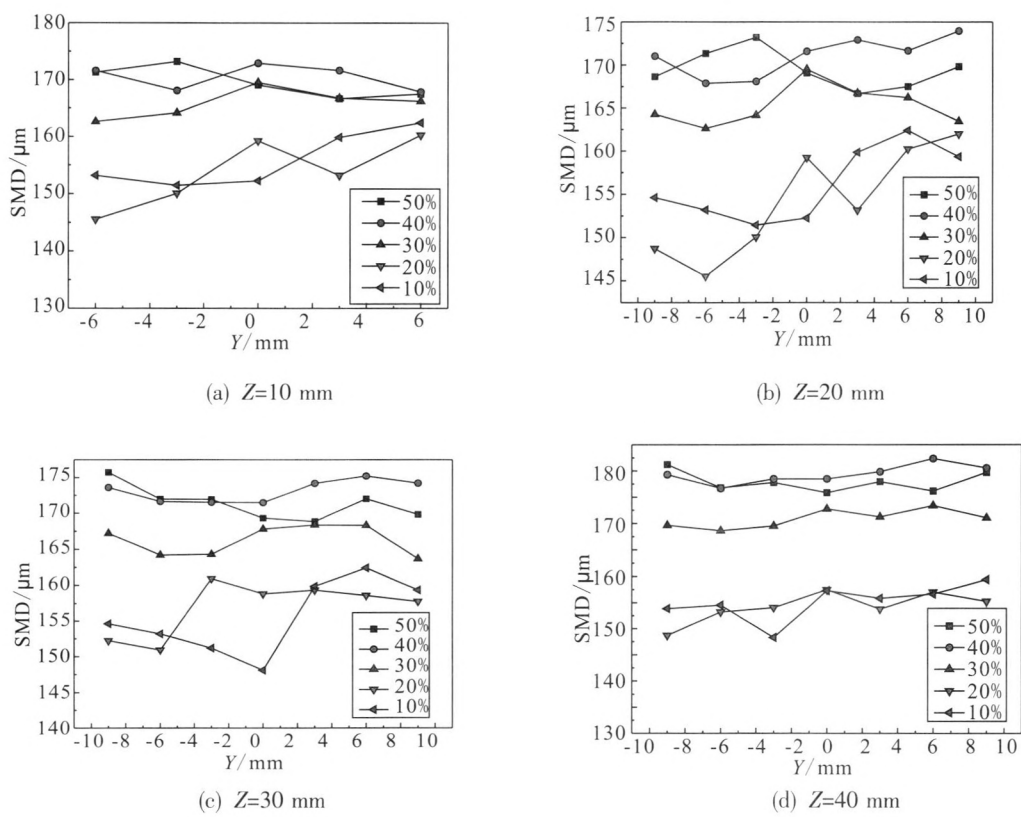


图 4 不同平面位置处的液滴 SMD 分布

Fig. 4 SMD distribution of droplets on various planes

由于不同工质的主要差别在于粘度系数的不同, 首先分析粘性对于液滴粒径的影响。液滴在气流中运动受到表面张力、内部的粘性力以及外部的气动力等作用力, 液滴的破碎是内外力之间平衡关系的打破造成的。当粘度系数增大时, 液滴抵抗外部作用力的能力增强, 变得更加稳定, 不易于破碎。随着粘度系数的提高, 在经历了初级雾化之后, 二次雾化变得更加困难, 因而形成的液滴颗粒尺寸较大。除此之外, 工质粘性还会影响喷嘴内部的流动过程, 粘度系数提高将会使雷诺数减小, 阻碍湍流的发展过程与后期液膜的破碎过程, 因而雾化得到的液滴尺寸也会变大。

虽然不同工质的表面张力系数也在变化, 但并不是造成不同工质雾化结果差异的主要原因, 在此简单分析表面张力对于液滴粒径的影响。表面张力也是影响雾化过程的重要物性参数。表面张力的作用是对液滴进行束缚, 阻碍液滴表面的变形。因此, 液滴的破碎一定要冲破表面张力的束缚。雾化过程的重要无量纲量 Weber 数表征了气动力与表面张力的相对大小。表面张力越大, Weber 数越小, 液滴破碎越困难, 因而形成的液滴尺寸将会越大。

对各个测量平面上所有测量点处的 SMD 进行算术平均得到的值认为是该平面的 SMD, 图 5 给出了撞击点下游各平面的 SMD。当粘度系数较小 (质量分数为 10% 与 20% 的工质) 且粘度系数不变时, 距离撞击点越远, 平面的 SMD 变化规律是逐渐减小并趋于一稳定值, 表明液滴粒径在此距离内达到稳定状态。当粘度系数较大 (质量分数为 30%~50% 的工质) 且保持不变时, 随着测量平面与撞击点距离的增加, 平面的 SMD 变化趋势为先减小后增大。这表明雾场液滴粒径还没达到稳定状态, 这是由于粘度系数增大, 液滴的二次雾化更加困难, 液滴将会在距离撞击点更远的区域发生二次雾化, 而在所测量的区域内, 液滴未完成二次雾化因而还处于非平衡状态。这表明粘度系数的提高将会导致雾场达到平衡状态时与撞击点的距离增加。

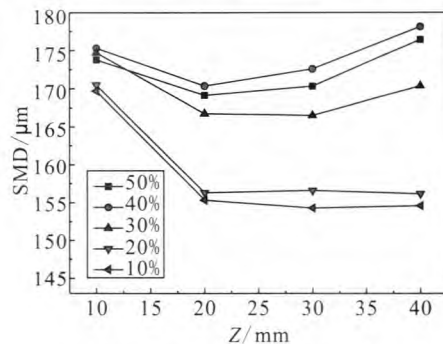


图 5 不同平面的液滴平均粒径

Fig. 5 Mean size of droplets on various planes

## 2.2 运动速度特性分析

对撞击点下游不同平面位置处液滴的运动速度特性进行分析。令  $X=0$ , 观测液滴运动速度分量  $U$ ,  $V$  和  $W$  沿  $Y$  轴方向的分布情况。撞击点下游 20 mm 与 40 mm 平面位置处, 液滴运动速度分量  $U$ ,  $V$  和  $W$  沿  $Y$  轴方向的分布曲线如图 6 (a~f) 所示。由撞击点下游同一平面位置处液滴的三维运动速度分布可以看出,  $Z$  轴方向的速度分量  $W$  分布规律为以  $Y=0$  为轴线近似呈轴对称分布。 $X$  轴方向的运动速度  $U$  与  $Y$  轴方向的运动速度  $V$  的分布规律为近似以该平面的原点为中心呈中心对称分布, 且  $Y$  轴方向的运动速度分量  $V$  相比于其它两个方向的运动速度分量而言绝对值都要小一些, 这是由于初始射流并不具有  $Y$  方向的分量  $V$ 。对比雾场同一位置点处不同粘度系数的三维速度分量可以看出, 随着粘度系数的提高, 各个方向的运动速度分量的绝对值有减小的趋势。这是由于液滴的运动速度是由液膜破碎时赋予液滴的, 随着粘性系数的提高, 液膜运动受到的粘性阻力越大, 液膜的运动速度会相对减小, 此时由液膜剥离出的液滴的运动速度也会相对减慢。

对撞击点下游同一平面位置处所有液滴三维运动速度的绝对值取算术平均, 认为是该平面液滴的平均运动速度大小。分别统计了撞击点下游 10 mm, 20 mm, 30 mm 与 40 mm 平面位置处液滴的平均运动速度, 如图 7 所示。选取撞击点下游某一平面, 随着粘性系数的提高, 该平面液滴的平均运动速度有减小的趋势。对于同一粘度系



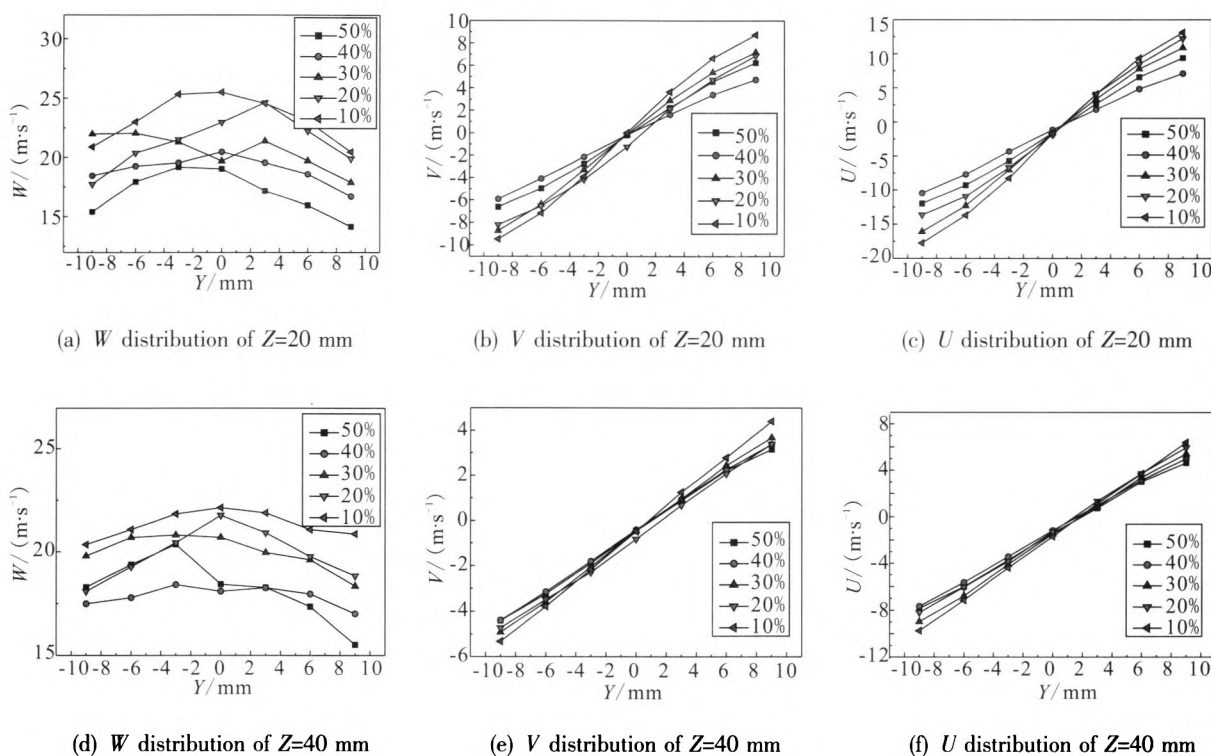


图6 不同平面位置处液滴的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of droplets on various planes

数的工质,越靠近喷雾流场下游区域,液滴的运动速度越小,这是由于液滴在运动过程中有动量损失造成的。

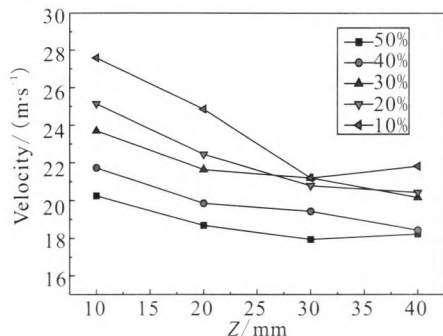


图7 不同平面位置处的液滴平均速度

Fig. 7 Mean velocity of droplets on various planes

### 3 结论

配制了粘度系数连续变化而密度与表面张力系数变化不大的一系列蔗糖溶液,通过在大气开放环境下开展两股射流撞击雾化的试验,获得了不同粘度系数工质的粒径场与速度场研究。得出

的主要结论如下:

1) 当粘度系数提高时,雾场某一固定位置处的液滴平均粒径有增加的趋势,运动速度则有减小的趋势。

2) 随着粘度系数的增加,雾场液滴粒径达到平衡状态时与撞击点的距离将会增加。

3) 液滴在  $Z$  轴方向的速度分量绝对值最大,  $X$  轴方向的速度分量绝对值要大于  $y$  轴方向速度分量的绝对值。液滴在  $Z$  轴方向的运动速度分量近似呈轴对称分布;  $X$  轴与  $Y$  轴的运动速度分量近似呈中心对称分布。

4) 粘度系数越高,撞击点下游某一平面的液滴平均运动速度越小;当粘度系数一定时,距离撞击点越远,该平面的液滴平均运动速度越小。

#### 参考文献:

- [1] 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.

- [2] 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.
- [3] RUPE J H. The liquid-phase mixing of a pair of impinging streams, Progress Report No. 20-195[R]. USA: Jet Propulsion Lab, 1953.
- [4] DOMBROWSKI N, HOOPER P C. A study of the sparys formed by impinging jets in laminar and turbulent flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 18(3): 392-400.
- [5] HEIDMAN M F, PRIEM R J, HUMPHREY J C. A study of sprays formed by impinging jets, NACA TN 3835[R]. USA: NACA, 1957.
- [6] LAI W H, HUANG T H, JIANG T L. Effects of fluid properties on the characteristics of impinging-jets sprays[J]. Atomization and Sprays, 2005 (15): 457-468.
- [7] YUAN T, CHEN C, HUANG B. Optical observation of the impingements of nitrogen tetroxide/ monomethylhydrazine stimulants[J]. Journal of AIAA, 2006, 44(10): 2259-2266.
- [8] 张蒙正, 张泽平, 李鳌, 等. 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.
- [9] 刘晓伟, 胡伟, 曹晶, 等. 鲁泊数和孔径比对直流互击式喷注器性能的影响[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 24-27.
- [10] 张力虎, 关平, 张龙, 等. PDPA 和激光全息术对喷嘴雾化特性的对比测量[J]. 江汉大学学报. 2009, 37(4): 26- 28.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 42 页)

## 4 结论

在充分继承成熟经验的基础上, 通过运用 I-DEAS/TMG 热分析软件, 对新型 25 N 双组元发动机进行了热控设计, 得到了一定边界条件下发动机头部在不同加热功率下的温度场, 根据计算结果选择了最优的功率组合。同时, 根据经验对发动机采取了被动热控措施。通过某卫星在轨飞行试验, 新型 25N 发动机热控表现良好, 设计的正确性得到验证。该设计目前应用于国内正在研制的 CE-5, XX-4 卫星等型号推进系统所采用的 25 N 发动机。

## 参考文献:

- [1] 苏生, 马巨印, 陈阳, 等. 航天器推进系统气路减压阀温度特性研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(4): 445-449.
- [2] 李联成, 张萍. 卫星管路加热带安装工艺方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 384-386.
- [3] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [4] 胡海峰, 鲍福廷, 蔡强, 等. 液体姿控火箭发动机地面试验热结构分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 442-447.
- [5] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- [6] TMG. I-DEAS 11ml NX series thermal analysis user's guide[M]. Plano, Texas: UGS PLM Solutions Inc, 2009.
- [7] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(编辑: 马 杰)