

# 燃烧条件下自燃推进剂的雾场及火焰实验研究

夏益志, 杨伟东, 王 勇, 洪 流

(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:**为研究双组元自燃推进剂喷雾燃烧的特点,在单互击式喷嘴矩形燃烧室内开展了一甲基肼/四氧化二氮(MMH/NTO)推进剂喷雾燃烧过程可视化实验,采用高速相机直接拍摄并获得了MMH/NTO的火焰自然发光图像,采用高速相机及光源后置消光法拍摄并获得了燃烧条件下MMH/NTO撞击后的雾场图像。通过实验得到了以下结论:燃烧条件下,MMH/NTO液相主要集中在喷注面附近的喷射雾化区,其面积随燃料射流速度增大而增大;MMH/NTO着火点距离喷注面距离及着火过程的火焰传播速度随推进剂喷射速度增加而增大;按自然发光亮度划分,MMH/NTO火焰分为外层火焰、内层火焰及焰心,焰心亮度最高,其面积随燃料喷射速度增加先减小后增大;MMH/NTO反应长度及火焰张角随燃料喷射速度增加而增大,与喷射雾化区随燃料喷射速度的变化趋势一致。

**关键词:**双组元推进剂;自燃;互击式喷嘴;雾化;燃烧

**中图分类号:**V434.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-9374(2019)04-0026-06

## Experimental study on the spray and flame of hypergolic bipropellants in hot-fire test

XIA Yizhi, YANG Weidong, WANG Yong, HONG Liu

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory,

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

**Abstract:** In order to study the detailed spray and combustion characteristic of hypergolic bipropellants utilizing unlike-impinging injector, experimental study was conducted to investigate the phenomena involved in the spray and combustion processes of neat methylhydrazine/nitrogen tetroxide (MMH/NTO) in a visualized combustion chamber. High-speed camera was used to record the natural flame luminosity firstly, then high-speed camera and back illumination light extinction was combined to record the spray images in hot-fire test. The results show that liquid propellants visible are mainly distributed in injection/atomization zone which is near the injector, and the area of injection/atomization zone increase with the increasing of fuel jet velocity. The distance from ignition position to injector face and flame propagation velocity also increase with the increasing of fuel jet velocity. Judging from the flame luminosity, the flame of MMH/NTO could be divided into outer flame, inner flame and flame core with highest brightness. The area of flame core decrease firstly and then increase with the increasing of fuel jet velocity. The induction length

收稿日期:2018-11-09;修回日期:2019-01-28

基金项目:液体火箭发动机技术重点实验室项目(6142704020203)

作者简介:夏益志(1992—),男,硕士,研究领域为雾化与燃烧技术

and angle of flame increase with the increasing of fuel jet velocity as well as the injection/atomization zone.

**Keywords:** bipropellants; hypergolic; unlike-impinging injector; spray; combustion

## 0 引言

双组元自燃推进剂在小推力液体火箭发动机中有着广泛的应用,其喷雾和燃烧特性实验研究早期主要采用水或模拟液冷试以及发动机热试<sup>[1-3]</sup>,因水及模拟液冷试无法完全反映自燃推进剂雾化及燃烧特性,有必要采用光学诊断技术实时观察其喷雾燃烧过程,通过可视化结果加深对其雾化及燃烧特性的认识。其中 George<sup>[4]</sup> 率先采用全息摄影技术观测 MMH/NTO 燃烧环境中的 MMH 液滴,提出了冷热液滴尺寸关系式, Zung 与 White<sup>[5]</sup>、Lawver<sup>[6]</sup> 进行了自燃推进剂混合与分离的相关可视化研究,观察了两股射流撞击后的混合与分离现象。Renaud Lecourt<sup>[7]</sup> 利用平面激光技术观察了 MMH/NTO 燃烧的撞击雾化液滴,以氩离子平面激光与铜离子蒸汽平面激光对燃烧的喷雾火焰的长轴与横切的截面拍摄了图像,测量其未燃液滴的尺寸与液滴浓度分布。普渡大学 Funk、Heister 等<sup>[8]</sup> 用一个模型撞击式喷注单元研究了自燃推进剂射流撞击点火特性。研究了射流直径、撞击速度、撞击角等参数对于点火特性的影响并用于指导新型自燃推进剂的研制。日本的 Yoshiki 等<sup>[9]</sup> 研究了双组元发动机脉冲模式下氧化剂沸腾对推进剂雾化燃烧的影响。袁晓峰等<sup>[10-11]</sup> 在冷流实验研究的基础上,开展了自燃推进剂燃烧过程可视化实验研究,并得到温度分布和火焰图像,但国内对燃烧条件下自燃推进剂的雾化和燃烧特性实验研究鲜有报道。

本文开展了 MMH/NTO 自燃推进剂在单互击式喷嘴矩形燃烧室内的喷雾燃烧过程实验,采用高速摄影获取了该推进剂燃烧条件下的雾场及火焰自然发光图像,获得了喷射速度对着火位置、液相区域大小、火焰传播速度、火焰形态及火焰自然发光亮度的影响,为该推进剂直流互击式喷嘴的设计优化及相关理论研究提供了参考。

## 1 实验装置及测量方法

### 1.1 实验装置

实验采用图 1 所示单互击式喷嘴矩形燃烧室,横

截面尺寸为 200 mm × 170 mm,轴向长度为 180 mm,主要由头部、身部及喉部组成。头部可安装不同结构的互击式喷注单元,身部带有四面石英玻璃观测窗,可全面观测喷注面及其下游 80 mm 轴向距离内的火焰图像,喉部可更换,主要用于研究室压影响。实验采用的互击式喷嘴如图 2 所示,氧化剂孔孔径为 0.4 mm,燃料孔孔径为 0.32 mm,喷嘴长径比  $L/D$  为 5,喷前自由射流长度为 5.5 mm,撞击角  $\beta$  为  $75^\circ$ 。

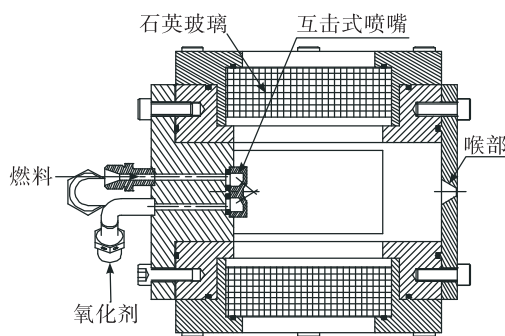


图1 单互击式喷嘴矩形燃烧室

Fig.1 Combustion chamber with impinging injector

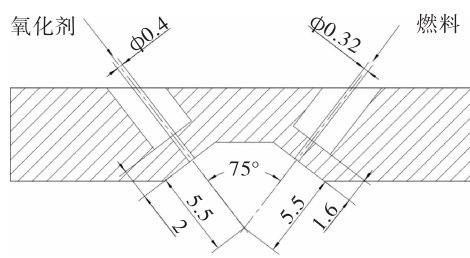


图2 互击式喷嘴示意图

Fig.2 Sketch of impinging injector

### 1.2 光学观测系统

实验时首先采用 Phantom V12 型黑白高速相机直接拍摄了 MMH/NTO 着火及稳态燃烧时的火焰自然发光图像,随后利用氙灯作为背景光源并湮没火焰自然发光,采用 Phantom V12 型黑白高速相机拍摄了 MMH/NTO 的喷雾液相部分图像,如图 3 所示。

为了减小较长曝光时间带来的时间累积观测误差,拍摄时相机曝光时间设置为  $1 \mu s$ ,拍摄速率

为 10 000 Hz。拍摄所得图像为灰度图,图像分辨率为  $800 \times 512$  像素。通过标定,像素点与实际尺寸的对应关系为  $0.14 \text{ mm/像素}$ ,拍摄精度满足观测要求。

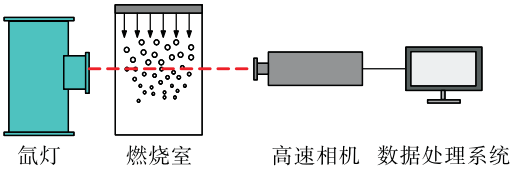


图 3 光学拍摄示意图

Fig. 3 Optical photoing setup

1.3 实验工况

实验工况如表 1 所示,保证动量比不变,重点通过改变推进剂流量研究推进剂喷射速度影响。每次实验点火时间为 3 s,稳态燃烧时间为 2 s,实验时流量采用科氏力流量计测量,压力通过压力传感器测量,所有测量设备在实验前均经过鉴定,符合测量要求。

表 1 实验工况

Tab.1 Test conditions

变量	1	2	3	4	备注
$\dot{m}_o / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	3.2	4	4.96	6.4	氧化剂流量
$\Delta p_o / \text{MPa}$	0.26	0.58	1.03	1.61	氧化剂压降
$\dot{m}_f / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	1.6	2	2.48	3.2	燃料流量
$\Delta p_f / \text{MPa}$	0.49	1.11	1.96	3.07	燃料压降
$V_f / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	23	28	35	45	燃料喷射速度
$p_c / \text{MPa}$	0.1	0.1	0.1	0.1	燃烧室室压

2 实验结果及分析

2.1 燃烧条件下的雾场结构

通过调节背景光湮没火焰自然发光所得稳态燃烧过程中 MMH/NTO 雾化阴影瞬时图像如图 4 所示,从图 4 中可以看出,燃烧条件下,MMH/NTO 撞击后仅可粗略观察到撞击形成的液膜、液丝及少量未气化液滴,推进剂液相所占视窗面积较小,主要集中在喷注面附近,该区域可认定为喷射雾化区<sup>[12]</sup>。图 5 给出了稳态燃烧时的雾场阴影均值图像,该图像为 2 000 张瞬时阴影图像(时长为 0.2 s)对应像素点灰度值做算术平均而得。从图 5 中可以

看出,燃烧条件下,MMH/NTO 撞击后形成的喷射雾化区近似呈扇形,当燃料射流速度为  $23 \text{ m/s}$  时,喷射雾化区的长度为  $5.1 \text{ mm}$ ,张角为  $66^\circ$ ,随着燃料射流速度的增加,MMH/NTO 撞击后形成的喷射雾化区的长度及张角增加,当燃料射流速度为  $45 \text{ m/s}$  时,MMH/NTO 撞击后形成的喷射雾化区的长度为  $10.6 \text{ mm}$ ,张角为  $134^\circ$ ,说明随着推进剂射流速度增加,推进剂流量增大,MMH/NTO 撞击后形成的喷射雾化区面积增大,推进剂雾化蒸发需求长度变长。

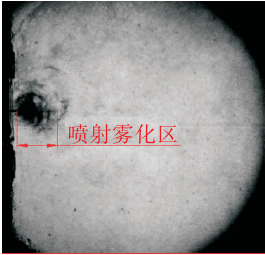


图 4 燃烧条件下 MMH/NTO 的雾场阴影图像 ( $V_f = 35 \text{ m/s}$ )

Fig. 4 Spray shadow image of MMH/NTO in hot-fire test ( $V_f = 35 \text{ m/s}$ )

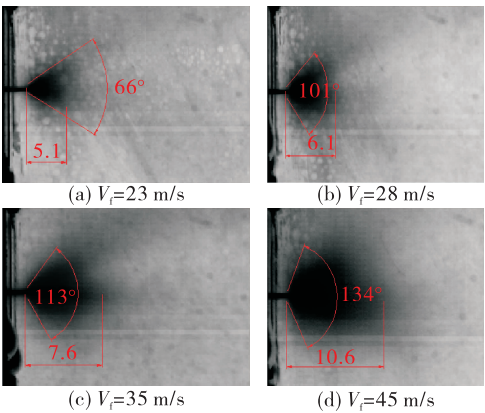


图 5 燃烧条件下 NTO/MMH 的雾场阴影均值图像

Fig. 5 Mean value images of MMH/NTO spray shadow in hot-fire test

2.2 燃烧火焰

2.2.1 着火过程

定义初始观察到火焰自然发光的位置为着火位置,得到着火位置与燃料射流速度的关系如图 6 所示,其中白色方框表示喷嘴位置。从图 6 中可以

出,燃料射流速度为 23 m/s, 28 m/s 时, MMH/NTO 着火点距离喷注面的最短距离相当, 均为 8.6 mm, 当燃料射流速度增大到 35 m/s, 45 m/s 后, 着火点距离喷嘴面的距离增加到 12.1 mm, 说明随着射流速度增大, 着火点距离喷注面的距离增大, 推断与图 6 中喷射雾化区长度增大相关。同时从图 5 中可以看出, 不同工况下的着火位置具有一定随机性, 图 6(a) 位于喷注面正下方, 而图 6(b) ~ 图 6(d) 则位于喷注面斜下方。不同射流速度下着火时初始观察到的火焰自发光的面积也不相等, 存在多点或多区域同时着火的情况, 如图 6(c) 所示, 其主要原因是着火首先发生在各参数最有利于着火的位置, 该位置对推进剂雾化、蒸发、混合及环境条件均较敏感, 具有一定随机性, 可能存在一片区域同时满足着火条件的情况, 当然这也可能与相机拍摄速率及光圈大小相关, 未能及时观察到真正着火点。

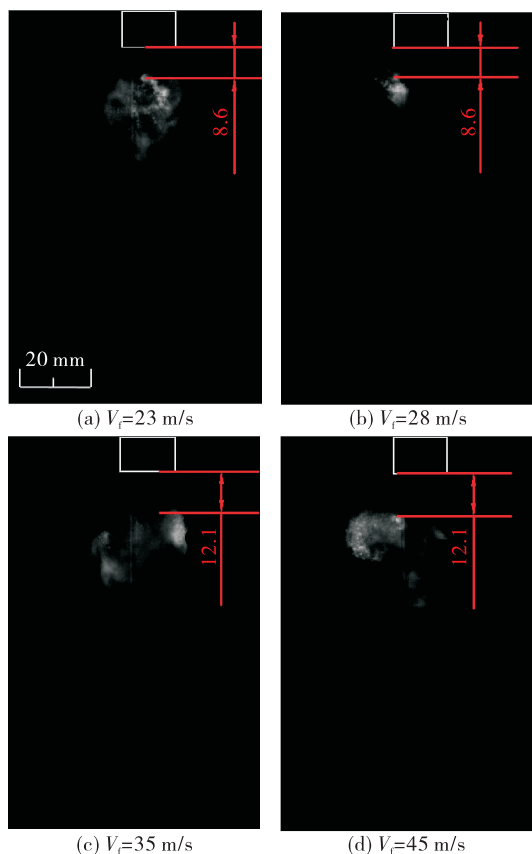


图6 着火位置图像

Fig. 6 Grayscale images of ignition position

图7给出了燃料射流速度为 28 m/s 时 MMH/NTO 的着火过程图像, 从图 7 中可以看出, 该工况下

MMH/NTO 撞击后在喷注面下游轴向 8.6 mm 处自燃着火后, 火焰向上游及下游快速发展, 最终火焰向上紧贴喷注面, 向下发展出可视区域, 之后火焰形态基本保持稳定。

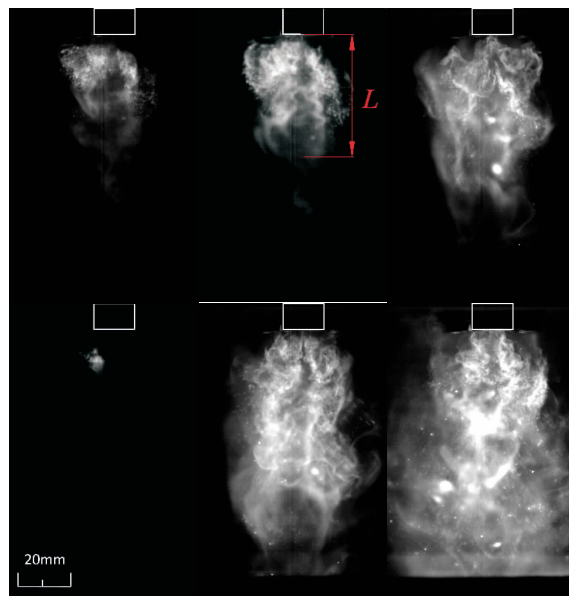
图7 着火过程图像 ( $V_f = 28 \text{ m/s}$ )Fig. 7 Images of ignition process ( $V_f = 28 \text{ m/s}$ )

图8给出了火焰前锋面与喷注面轴向距离和燃料喷射速度的关系曲线, 其中火焰前锋面与喷注面轴向距离  $L$  的定义如图7所示。

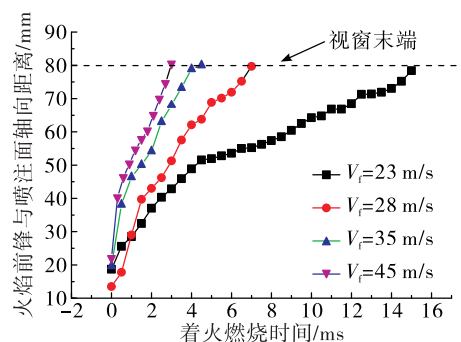


图8 火焰前锋面与喷注面距离

Fig. 8 Axial distance from injector face to flame front

从图8可以看出, 当燃料射流速度为 23 m/s 时, 火焰前锋面发展到视窗末端需要 15 ms, 火焰平均传播速度为 5.3 m/s。随着燃料射流速度增加, 火焰前锋面发展到视窗末端需求时间缩短, 火焰传

播速度增大,当燃料射流速度为 28 m/s 时,火焰前锋面发展到视窗末端需要 7 ms,火焰平均传播速度为 11.4 m/s,当燃料射流速度为 35 m/s 时,火焰前锋面发展到视窗末端需要 4.3 s,火焰平均传播速度为 18.6 m/s,当射流速度为 45 m/s 时,火焰前锋面发展到视窗末端只需要 3 ms,火焰平均传播速度为 26.7 m/s。故可以看出,火焰传播速度与燃料射流速度呈正比,燃料射流速度越大,着火时火焰传播速度越快。

### 2.2.2 稳态火焰

通过对 200 张稳态火焰自然发光图像进行算术平均得到的 MMH/NTO 火焰时均伪彩图像如图 9 所示。从图中 9 可以看出,根据亮度划分,MMH/NTO 火焰可分为外层火焰、内层火焰及焰心 3 个区域,其中外层火焰颜色与背景相似,考虑到推进剂撞击后由内向外扩散,外层推进剂密度较低,可以认为该区域化学反应较弱,MMH/NTO 化学反应主要发生在青黄色内层火焰或及红色焰心区域。从图 10 中

可以看出,红色中心区域火焰亮度最高,因为火焰亮度与含碳量及温度均正相关。从图 10 瞬时图像可以看出,当燃料喷射速度为 23 m/s 时,图中可观察到大量白色饱和亮点,可以认为这是大液滴或液滴群在高温下灼烧发出的白光,其发光强度远大于气相化学反应发光强度,出现亮度饱和,故可以认为图 9 中红色区域是大液滴或液滴群集中区域,亮度主要来自含碳大液滴或液滴群高温下灼烧发光。而随着燃料射流速度增加,从图 10 可以看出,火焰内部白色饱和亮点减少,说明大液滴或液滴群数量减少,导致火焰亮度降低,燃料喷射速度从 23 m/s 增加到 35 m/s 时,图中红色区域的亮度及面积变小,火焰整体亮度变低,但当燃料喷射速度增加到 45 m/s 时,图 9 中红色区域面积再次变大,因为此时图 10 中基本观察不到燃烧的液滴或液滴群,可以推断造成亮度饱和的主要原因是气相化学反应加剧,温度升高,反应生成的光子更多。

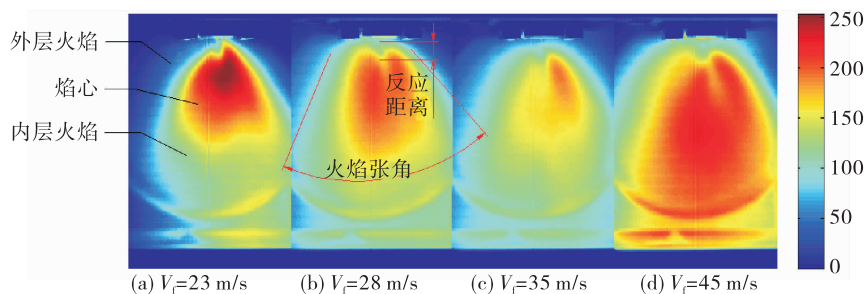


图 9 NTO/MMH 稳态燃烧的火焰时均图像(伪彩图)

Fig. 9 Natural flame mean value images of MMH/NTO (pseudo-color-image)

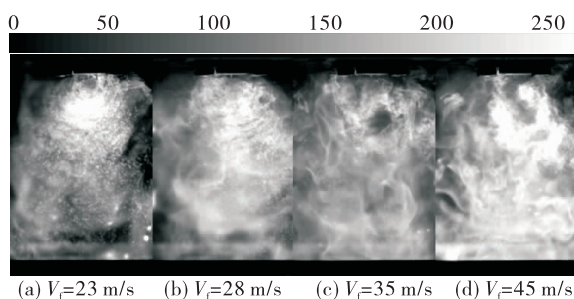


图 10 NTO/MMH 稳态燃烧的火焰瞬时图像

Fig. 10 Natural flame instantaneous images of MMH/NTO

从图 9 可以看出,焰心区域上游中心均存在一

个凹腔,与图 5 中扇形喷射雾化区对应,定义撞击点到凹腔底端距离为反应长度<sup>[11]</sup>,定义内层火焰张角为火焰张角,如图 9 所示,其中撞击点到喷注面距离通过图 5 计算。得到不同燃料射流速度下的反应长度及火焰张角如图 11 和图 12 所示。从图 11 可以看出,MMH/NTO 反应长度随燃料喷射速度增加而增加,与喷射雾化区长度变化趋势相同,但反应长度数值大于图 5 喷射雾化区长度。从图 12 可以看出,火焰张角同样随燃料喷射速度增加而增加,与喷射雾化区张角变化趋势相同,但火焰张角小于喷射雾化区张角,故可以看出,MMH/NTO 火焰形态与喷射雾化区形态存在一定关联。

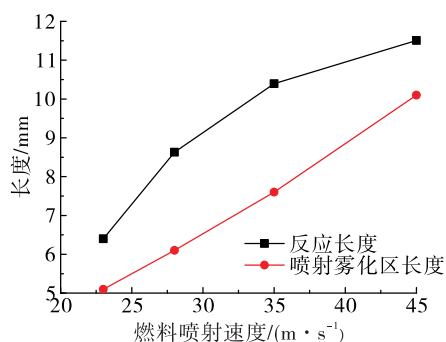


图11 反应长度与燃料喷射速度关系

Fig. 11 Induction length in different fuel jet velocity

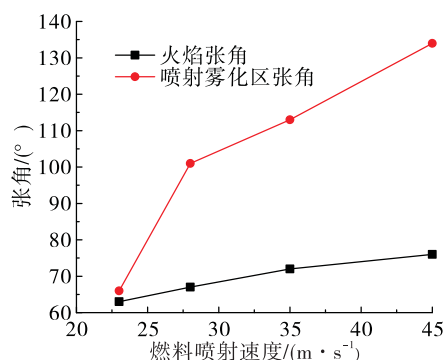


图12 火焰张角与燃料喷射速度关系

Fig. 12 Flame angle in different fuel jet velocity

### 3 结论

本文开展了 MMH/NTO 自燃推进剂喷雾燃烧过程光学观测,获取了燃烧条件下的雾场及火焰自然发光,得到以下结论:

1) 燃烧条件下,MMH/NTO 液相主要集中在喷注面附近的喷射雾化区,其面积随燃料射流速度增大而增大。

2) MMH/NTO 着火点距离喷注面距离及着火过程火焰传播速度随燃料喷射速度增大而增大。

3) 按照亮度划分,MMH/NTO 火焰分为外层火焰、内层火焰及焰心,焰心面积及亮度随燃料喷射速度先减小后增大,主要原因是低速情况下火焰发光度主要来自大液滴或液滴群燃烧,而高速情况下火焰发光亮度主要来自气相反应化学发光。

4) MMH/NTO 反应长度及火焰张角随燃料喷射

速度增加而增大,与喷射雾化区随燃料喷射速度变化趋势一致。

#### 参考文献:

- [1] RUPE J H. The liquid-phase mixing of a pair of impinging streams [Z]. Progress Report No. 20-195.
- [2] 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.
- [3] 张蒙正,李军,陈炜,等. 互击式喷嘴燃烧室燃烧效率实验[J]. 推进技术,2012,33(1):54-57.
- [4] GEORGE D. Rocket injector hot firing and cold flow spray fields [C]//9th Propulsion Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1973.
- [5] WHITE J R, ZUNG L B. Combustion process of impinging hypergolic propellants [J]. Critical Inquiry, 2009, 35(3): 481-492.
- [6] LAWVER B R. Photographic observation of reactive stream impingement [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2015, 17(2): 134-139.
- [7] LECOURT R, FOUCAUD R. Hypergolic propellant burning spray visualization by laser sheet method: Application to droplet size and liquid concentration measurement [Z]. ASME 1993.
- [8] FUNK J, RUSEK J, HEISTER S. Reaction zones for impinging jets and sheets [C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [9] MATSUURA Y, TASHIRO Y. Hypergolic propellant ignition phenomenon with oxidizer two-phase flow injection [C]//49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [10] YUAN T, CHEN C, HUANG B. Comparison of hot-fire and cold-flow observations of nitrogen tetroxide/monomethylhydrazine impinging combustion [J]. AIAA Journal, 2009, 47(10): 2359-2367.
- [11] YUAN T, CHEN C, HUANG B, et al. The impinging-type injector design of MMH/NTO liquid rocket engine [C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [12] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1995.

(编辑:马 杰)