

喷嘴形式对幂律型非牛顿推进剂雾化特性的影响

李龙飞, 张蒙正, 杨伟东, 王延涛

(中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 为寻求幂律型非牛顿推进剂有效的雾化喷嘴形式,采用与该推进剂流变特性基本一致的水基模拟液对直流式喷嘴、撞击式喷嘴、剪切撞击式气动雾化喷嘴、气泡雾化喷嘴和离心式喷嘴进行了雾化特性实验,比较了喷嘴形式及其结构参数对雾化特性的影响.结果表明:撞击式喷嘴是一种有效的雾化形式,撞击角度和射流速度是主要影响参数;气泡雾化喷嘴是一种高效的雾化方法,在约为 4% 的气液比下使水基模拟液破碎并产生液滴.

关 键 词: 幂律型; 推进剂; 非牛顿流体; 雾化喷嘴; 雾化特性

中图分类号: V434.13

文献标志码: A

Effects of different injectors on spray characteristics of power-law non-Newtonian propellant

LI Long-fei, ZHANG Meng-zheng, YANG Wei-dong, WANG Yan-tao

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

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

Abstract: In order to seek the effective injector type of the power-law non-Newtonian propellant, a water-based simulants whose rheological behavior was in accord with actual propellant was used. The injectors, including plain orifice, impinging injector, shearing impinging pneumatic atomizer, effervescent atomizer and swirling injector were investigated by experiments, and the effects of different injectors and their structural parameters on the spray characteristics were compared. The results indicate that the impinging injector is effective and its impinging angle and injection velocity are the main influencing parameters to spray property. The effervescent atomizer is an effective injector type. Water-based simulants break up and produce drops when ratio of air/liquid mass flow rate is about 4%.

Key words: power-law; propellant; non-Newtonian fluid; atomizer; spray characteristics

幂律型推进剂是在液体推进剂中均匀溶入固体颗粒(金属或非金属),再通过胶凝剂和辅助剂作用而生成的静态“有形”、在一定切应力作用下能恢复液态,并与原推进剂有相近物理性质的混合物^[1].从流体力学的观点出发,它属于一种特殊的非牛顿流体,剪切黏度与剪切速率之间不是线

性关系,其流变特性满足幂律型本构方程,具有高黏性、剪切变稀和液流反弹等特性,这些流动特性使得幂律型推进剂的雾化非常困难,雾化特性与液体推进剂存在显著区别.国内外学者针对特定的推进剂开展流变特性^[2-5]、雾化特性^[6-15]以及燃烧过程基础研究^[16-17].在雾化特性研究方面,国外

收稿日期:2013-08-05

基金项目:基础科研项目(A0320060745)

作者简介:李龙飞(1977—),男,湖南邵阳人,高级工程师,硕士,主要从事液体火箭发动机喷雾燃烧研究.

开展了撞击式喷注单元实验和理论分析^[6-12]、水凝胶三股撞击式气助雾化喷嘴雾化特性实验^[13]等.近年来,国内富庆飞和王枫等^[14-15]对幂律流体液膜破裂进行了线性稳定性和非稳定性理论分析,认识了幂律型推进剂的液膜破碎机理.由于每个研究者使用的幂律型推进剂存在较大的差异,获得的结果并不完全一致,也较少地对使用同种幂律型推进剂、不同形式喷嘴进行细致比较.本文采用与幂律型推进剂的稠度系数、流变指数等流变特性相一致的水基模拟液进行了雾化特性实验,水基模拟液的流变特性见文献[5].比较了直流式喷嘴、撞击式喷嘴、气泡雾化喷嘴、剪切撞击式气动雾化喷嘴、离心式喷嘴形式及其结构参数对雾化特性的影响.所得结果为幂律型推进剂喷嘴设计及其工程应用提供参考.

1 实验方法

幂律型非牛顿推进剂属于时间依赖的剪切变稀类非牛顿流体,采用气体挤压式供应系统向喷嘴供应推进剂时,流量随时间有一定的衰减,文献[18]对它进行了分析和实验系统改进.图1给出了幂律型非牛顿推进剂雾化特性实验系统原理,主要包括水基模拟液供应系统、气体供应系统、流量测量装置、喷嘴、高速动态分析系统、控制测量系统以及推进剂回收系统等.

水基模拟液供应采用的是液压活塞挤压式,一方面避免了挤压用气体溶解在水基模拟液中而对实验结果产生影响;另一方面有效解决了水基模拟液流量衰减问题.液压活塞挤压式装置的工作原理为液压泵通过将液压油挤入或抽出推拉缸来实现活塞的前进或后退,同时产生特定的压力作用在缸内的水基模拟液上,水基模拟液受力后通过活塞缸前端的管道供入至喷嘴.

气体供应系统的主要作用是吹除管路和喷嘴,以及为气体辅助雾化提供气源.水基模拟液的主要成分是水 and 胶凝剂,流变特性与真实的幂律型非牛顿推进剂相同.由于水基模拟液的高黏性,流量测量装置采用科氏力质量流量计,质量流量计型号为 KROHNE1081 K+F;压力采用 Macro 压力传感器测量.喷雾场记录采用高速动态分析系统,主要包括激光光源、高速摄影机和图像分析处理器 3 部分.激光光源采用铜蒸气激光器,高速摄影机为空间分辨率为 256 像素×256 像素的 CCD (charge coupled device) 相机,拍摄雾场时能分辨最小液滴直径为 40 μm ,采集速率为 4500 帧/s.

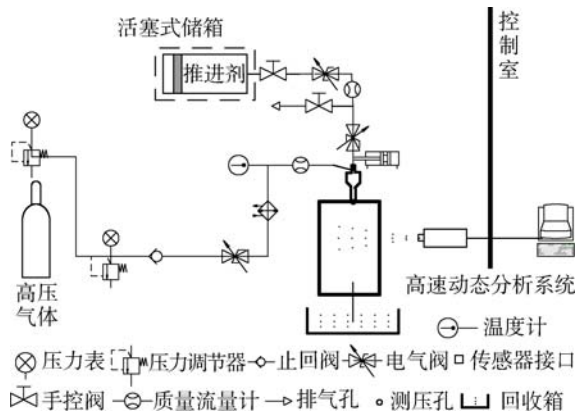


图1 幂律型非牛顿推进剂雾化特性实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experiment system of spray characteristics for power-law non-Newtonian propellant

2 实验结果与分析

2.1 直流式喷嘴

图2给出了孔径为1mm、喷嘴长度与直径之比(简称长径比)为2的直流式喷嘴的射流图像.图像的上边界距离喷嘴出口为52mm,从左到右出口处水基模拟液的射流速度 u 分别为3, 9.8, 13.8 m/s.从图2中看出,水基模拟液射流为一股柱状,没有出现雾化;射流状态下水基模拟液出现了表面不稳定波,随着射流速度的增大表面不稳定波增强.

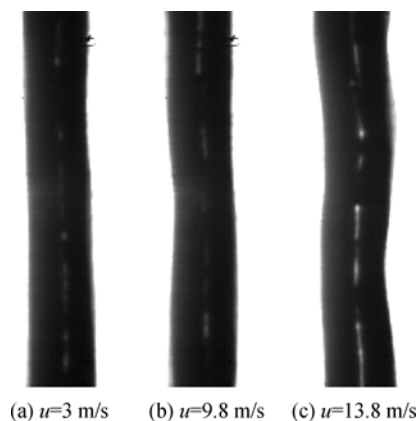


图2 直流式喷嘴水基模拟液射流图像

Fig. 2 Injection images of water-based simulants of plain orifice

2.2 撞击式喷嘴

选择撞击角度为 60° 、喷孔直径为1mm、喷孔长径比为2的撞击式喷嘴,在射流速度 u 范围为5~36 m/s 进行水基模拟液雾化特性研究,雾场

特性图像如图 3 所示. 从图 3(a)~图 3(d)中可以看出,随着两股射流速度的增加,喷雾过程依次经历了闭合边缘模式、液膜张开模式、边缘敞开模式和周期性液丝模式. 随着射流速度的继续增加,不稳定波的振幅增加,液膜在不稳定波的控制下形成周期性的液丝向外传播,没有观察到明显的液丝到液滴的破碎过程,主要为液丝与液滴共存.

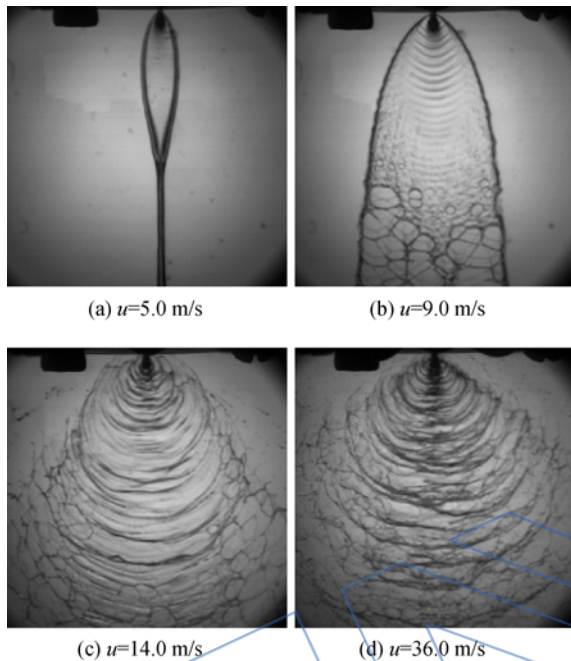


图 3 撞击式喷嘴水基模拟液雾化图像
Fig. 3 Sprayed images of water-based simulants of impinging injector

图 4 给出了一组典型的水基模拟液在相同射流速度下撞击角度对雾化特性影响的图像,喷嘴直径为 1 mm、喷嘴长径比为 2. 从图 4 中可以看到,在相同射流速度时,撞击角度变化对雾场结构影响很大. 撞击角度增大,液膜展开充分,并且液膜也容易破碎,在撞击角度为 90° 时,在雾场的下游可以看到了液丝和液滴共存的区域.

2.3 气泡雾化喷嘴

气泡雾化喷嘴实验件如图 5 所示,变化的结构参数主要为喷嘴出口直径、气孔和出口面积比等. 对不同结构参数、不同气液比下的气泡雾化喷嘴进行了雾化特性实验,辅助气体为常温高压氮气. 气液比的定义为辅助气体与水基模拟液的流量之比,记为 α . 图 6 给出了一组典型水基模拟液在水基模拟液流量为 25 g/s、气液比变化范围为 4%~15% 的雾化图像,喷嘴出口直径为 2.6 mm. 从图 6 中可以看出,水基模拟液在喷嘴出口不远

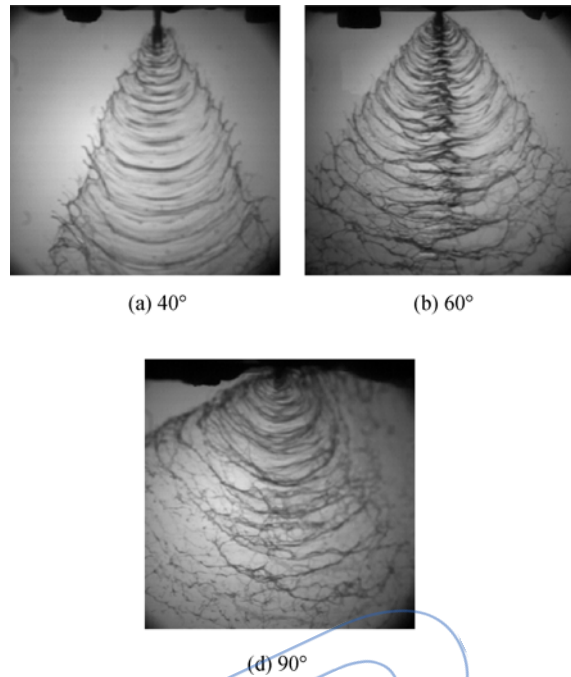


图 4 射流速度为 25 m/s 时不同撞击角度的雾化图像
Fig. 4 Sprayed images of different impinging angles on injection velocity of 25 m/s

处破碎,雾化为液滴或很细的液丝;增大气液比,水基模拟液破碎距离显著减小,喷雾角度从 12° 增大至 20° . 这主要是气液比增大使得气体有更大的压缩量,喷出出口后气体膨胀、爆炸并释放更大的能量,使得水基模拟液在更短的距离内破碎、雾化.

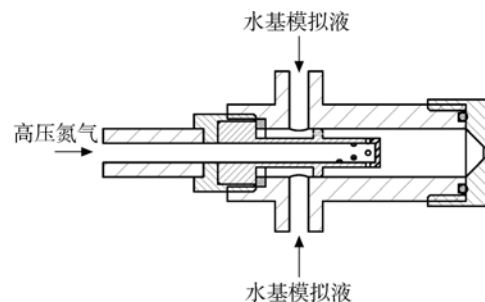
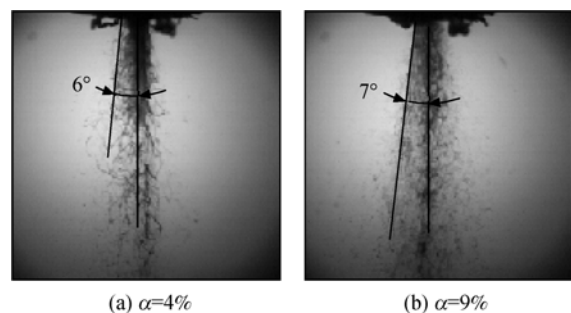


图 5 气泡雾化喷嘴
Fig. 5 Effervescent atomizer



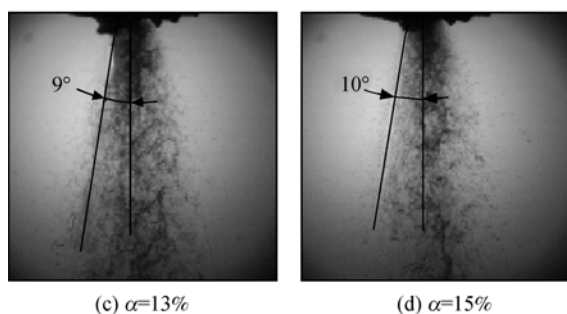


图6 不同气液比下气泡雾化喷嘴雾化图像
Fig. 6 Sprayed images of effervescent atomizer on different ratios of air/liquid mass flow rate

图7给出了气液比为15%条件下距离喷嘴出口不同轴向距离下水基模拟液的雾化图像,轴向距离以喷嘴出口为起始点,图像的顶端为终止点.从图中看出,在该气液比下距离喷嘴出口20

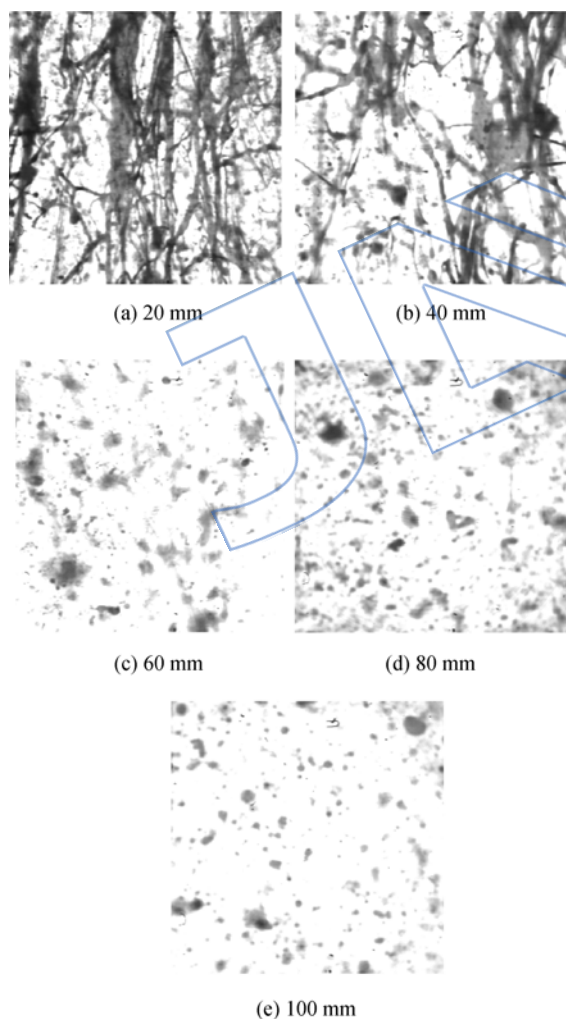


图7 $\alpha=15\%$ 条件下不同轴向距离的气泡雾化喷嘴雾化图像
Fig. 7 Sprayed images of effervescent atomizer on different axis distances with $\alpha=15\%$

mm处出现了少量的液滴,距离喷嘴出口60 mm的距离内基本雾化为液滴.

2.4 剪切撞击式气动雾化喷嘴

剪切撞击式气动雾化喷嘴兼具撞击式喷嘴和气动雾化喷嘴的优势,气动雾化喷嘴是利用一定压力的辅助气体,高速喷出后撞击、剪切射流速度较低的高黏性推进剂,将其撕裂成液丝和液滴.图8为剪切撞击式气动雾化喷嘴的结构示意图,喷嘴中心供应水基模拟液;外圈为高压氮气,在喷嘴出口处分为两路:一路位于撞击式气动喷嘴外圈;另一路通过2~4个对称小孔喷出,并与液体射流成一定的夹角,对液体进行撞击.与常规的同轴式气助雾化喷嘴相比,剪切撞击式气动雾化喷嘴增加了两股气体射流,目的在于利用高速气流的强剪切力,对同轴式液体推进剂进行剪切作用;另一方面两股气体射流撞击并和中心同轴式气液两相流形成近似于3股撞击式喷嘴.图9给出了一个典型的雾化实验图像,所使用的水基模拟液喷嘴出口直径为1.5 mm,气孔直径为1.0 mm,撞击角度为45°,水基模拟液喷嘴压降为0.27 MPa,流量恒定为27.5 g/s,变化氮气的流量使气液比分别为3%,7.3%和13%.从图中看出,气液比 $\alpha=3\%$ 时水基模拟液边缘雾化良好,但中心存在锯齿状的液核,表明气动力未能穿透高黏性的水基模拟液; $\alpha=7.3\%$ 时,液柱与雾化气体间存在较高的相对射流速度形成大的剪切力,同时气孔喷出的辅助气体穿透力增强并高速撞击液核,水基模拟液的液核在强的剪切力和撞击力作用下实现雾化,喷口下游表现为液丝与液滴共存.对比 α 为3%和7.3%的雾化图像,看出气液比增大则破碎长度显著减小、喷雾角增大,但随着气液比的持续增大(对比 $\alpha=7.3\%, 13\%$),雾化差异不显著.

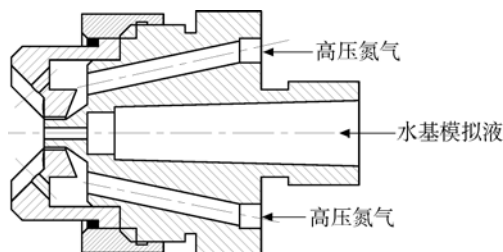


图8 剪切撞击式气动雾化喷嘴的结构示意图
Fig. 8 Schematic of shearing impinging pneumatic atomizer structure

2.5 离心式喷嘴

离心式喷嘴是大推力液体火箭发动机常用的

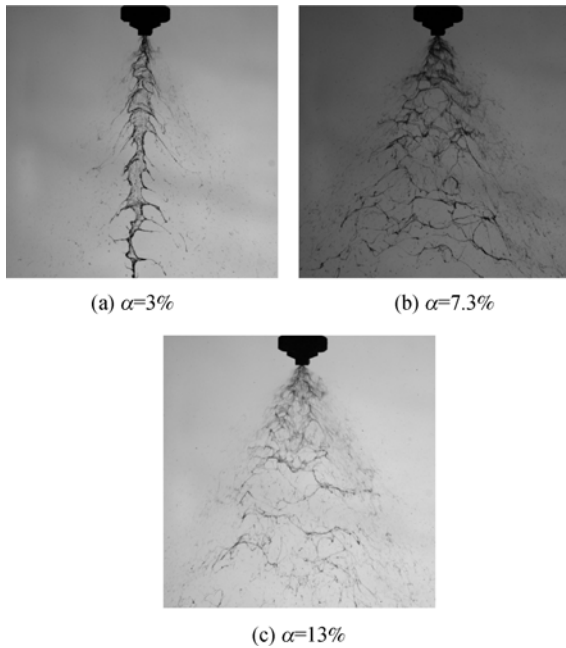


图 9 剪切撞击式气动雾化喷嘴的雾化图像
Fig. 9 Sprayed images of shearing impinging pneumatic atomizer

喷嘴形式,结构示意图如图 10 所示.水基模拟液通过切向孔进入喷嘴内部形成膜状并沿喷嘴内壁旋转喷出,能非常好地雾化水、煤油等牛顿流体,尤其是适合大流量水基模拟液雾化.图 11 给出了

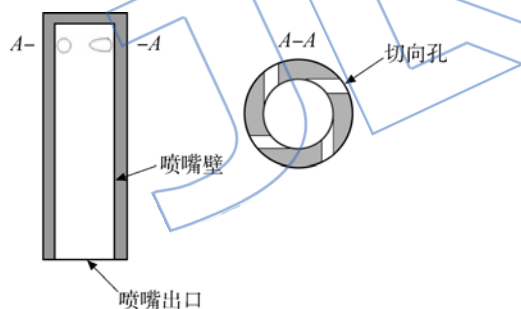


图 10 离心式喷嘴的结构示意图
Fig. 10 Schematic of swirling injector structure



(a) 水的雾化



(b) 水基模拟液的雾化

图 11 离心式喷嘴雾化图像

Fig. 11 Sprayed images of swirling injector

离心式喷嘴对水和水基模拟液的雾化图像,其中水作为工质的喷嘴压降为 0.7 MPa,而水基模拟液的压降为 1.85 MPa.从图 11 中可以看出,喷嘴出口处的流态均成液膜状,水基模拟液的压降远高于水工质;水基模拟液主要以膜的形式一直存在,没有出现液滴.

3 结 论

幂律型非牛顿推进剂的高黏性是影响其雾化的主要因素,设法减小或者消除其固有的高黏性,采用合适的喷嘴形式是实现雾化的前提.本文采用与幂律型非牛顿推进剂的稠度系数、流变指数等流变特性参数相一致的水基模拟液进行了雾化特性实验,比较了多种喷嘴形式对雾化特性的影响,得到的主要结论如下:

1) 撞击式喷嘴、气泡雾化喷嘴和剪切撞击式气动雾化喷嘴能够实现幂律型非牛顿推进剂的雾化.相对于剪切撞击式气动雾化喷嘴,气泡雾化喷嘴所需要的辅助气体更少,在气液比约为 4% 下可使水基模拟液破碎并产生液滴.

2) 撞击式喷嘴的撞击角度和射流速度是主要影响参数;气泡雾化喷嘴的气液比是影响雾化特性的重要参数,随着气液比增大雾化性能变好,气液比增加到某值后雾化性能趋于稳定.

本文仅对喷嘴形式对高黏性幂律型非牛顿推进剂雾化特性的影响进行了比较,筛选了适用的喷嘴形式,后续将详细地研究喷嘴结构参数及工作参数对雾化特性和燃烧特性的影响.

参考文献:

- [1] 张蒙正,陈炜,杨伟东,等.撞击式喷嘴幂律型推进剂雾化及表征[J].推进技术,2009,30(1):46-51.
ZHANG Mengzheng, CHEN Wei, YANG Weidong, et al. Atomization and characteristics of gelled propellant with

- impinging injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(1): 46-51. (in Chinese)
- [2] Benveniste N, Shai R. The status of gel propellants in year 2000[C]//Proceedings of 5th International Symposium on special Topics in Chemical Propulsion. Stresa, Italy: Combustion of Energetic Materials, 2000: 172-194.
- [3] Madlener K, Ciezki H K. Some aspects of rheological and flow characteristic of gel fuels with regard to propulsion application[R]. AIAA-2009-5240, 2009.
- [4] James M G, Douglas C R, James R. Flow visualization of a rocket injector spray using gelled propellant simulants[R]. AIAA 91-2198, 1991.
- [5] 魏超, 杨伟东, 毛根旺. 某高分子胶凝剂幂律型推进剂模拟液的流变特性[J]. 航空工程进展, 2011, 2(1): 110-114.
WEI Chao, YANG Weidong, MAO Genwang. Rheological behavior of a polymer-gellant gel propellants simulants[J]. Advanced in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(1): 110-114. (in Chinese)
- [6] Mauro B. Investigation of the spray characteristics of the gelled fuel Jet A-1 using an impinging jet spray[R]. DLR/IB647-2003/5, 2003.
- [7] Chojnacki K T, Feikema D A. Spray studies of gelled liquids[R]. AIAA 94-2773, 1994.
- [8] Chojnacki K T, Feikema D A. Spray studies of gelled bi-propellant simulants using planar laser induced fluorescence[R]. AIAA 95-2423, 1995.
- [9] Von Kampen J, Madlener K, Ciezki H K. Characteristic flow and spray properties of gelled fuels with regard to the impinging jet injector type[R]. AIAA-2006-4573, 2006.
- [10] Ciezki H K, Robers A, Schneider G. Investigation of the spray behavior of gelled Jet A-1 fuels using an air blast and impinging jet atomizer[R]. AIAA-2002-3601, 2002.
- [11] James M D, Kubal T D, Son S F, et al. Calibration of an impinging jet injector suitable for liquid and gelled hypergolic propellants[R]. AIAA-2009-4882, 2009.
- [12] Negri M, Helmut K C. Atomization of non-Newtonian fluids with an impinging jet injector; influence of viscoelasticity on hindering droplets formation[R]. AIAA-2010-6821, 2010.
- [13] Rahimi S, Natan B. Air-blast atomization of gel fuels[R]. AIAA-2001-3276, 2001.
- [14] FU Qingfei, YANG Lijun, QU Yuanyuan, et al. Linear stability analysis of a conical liquid sheet[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(5): 955-968.
- [15] 王枫, 富庆飞, 杨立军. 幂律流体液膜破裂的线性稳定性分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 876-881.
WANG Feng, FU Qingfei, YANG Lijun. Linear instability analysis of a power-law liquid sheet[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 876-881. (in Chinese)
- [16] Solomon Y, Natan B, Cohen Y. Combustion of gel fuels based on organic gallants[R]. AIAA-2006-4565, 2006.
- [17] 张蒙正, 李军, 陈伟, 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.
ZHANG Mengzheng, LI Jun, CHEN Wei, et al. Experiments on combustion efficiency for impinging injector chamber[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(1): 54-57. (in Chinese)
- [18] 王枫, 李龙飞, 杨伟东. 凝胶推进剂流动雾化特性实验系统的改进及应用[J]. 实验技术与管理, 2012, 20(1): 72-75.
WANG Feng, LI Longfei, YANG Weidong. Improvement of test system for gelled propellants flow and spray characteristics and its application[J]. Experimental Technology and Management 2012, 20(1): 72-75. (in Chinese)