

流量脉动对燃油喷嘴雾化过程影响的实验研究

靳朝阳, 芦翔, 葛冰, 臧述升

(上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:针对航空发动机燃烧室中存在的燃油流量脉动问题开展实验研究,设计并搭建了燃油喷嘴流量脉动激光可视化实验台,在等流量条件下利用高频激光粒子图像速度仪(High Speed Particle Image Velocimetry, PIV)分析燃油脉动频率变化对喷嘴雾化特性影响。实验结果表明:流量脉动促进了液膜表面的发展及液膜的破碎,对喷嘴的雾化产生积极的影响;喷嘴下游带状液膜区的发展和液滴的瞬态速度与喷嘴的流量脉动频率具有一致性;液滴的瞬态速度脉动幅值受脉动频率影响,在50 Hz时存在极大值。

关键词:压力雾化喷嘴;燃油流量脉动;雾化过程可视化;发动机燃烧室燃油雾化

中图分类号:V233.2⁺2

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.016

[引用本文格式]靳朝阳, 芦翔, 葛冰, 等. 流量脉动对燃油喷嘴雾化过程影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(9): 126-131. JIN Zhao-yang, LU Xiang, GE Bing, et al. Experimental study on the influence of flow pulsation on the atomization process of fuel nozzle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 126-131.

Experimental Study on the Influence of Flow Pulsation on the Atomization Process of Fuel Nozzle

JIN Zhao-yang, LU Xiang, GE Bing, ZANG Shu-sheng

(Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: In order to analyze the problem of fuel flow pulsation in the combustion chamber of an aero-engine, a laser visualization experimental bench for fuel flow pulsation of the nozzle was designed and built to investigate the effect of the change of fuel pulsation frequency on the atomization characteristics of the nozzle. The influence of flow pulsation frequency on the atomizing flow field of pressure atomizing nozzle was studied by using the High Speed Particle Image Velocimetry (PIV) under the condition of constant flow. The experimental results show that the flow pulsation promotes the development of the liquid film surface and the breakage of the liquid film, and has a positive effect on the atomization of the nozzle. The development of banded liquid film area downstream of the nozzle and the transient velocity of droplet are consistent with the flow pulsation frequency of the nozzle. The amplitude of the transient velocity pulsation of the droplet is affected by the pulsation frequency and has a maximum value at 50 Hz.

Key words: pressure atomizing nozzle, fuel flow pulsation, visualization of atomization process, fuel atomization in the engine combustion chamber

引言

在航空发动机实际工作过程中,燃油供应系统存在压力脉动,引起燃烧室内燃油流量脉动。燃烧室内燃油流量的脉动变化会破坏原有的雾化设计,对喷嘴的雾化过程产生影响,进而引起燃烧室内热释放率和压力场的变化。如果燃烧室内放热率的波动与燃烧室内压力脉动发生耦合,燃烧室内发生热声耦合现象,会降低系统工作的稳定性,降低燃烧效率^[1-3]。

喷嘴上游脉动对下游雾化的影响是喷嘴动力学的研究内容。Bazarov^[4]对喷嘴动力学进行了开创性研究,基于喷嘴内部小扰动的传播发展了一个动力学线性理论模型,并用此模型分析了喷嘴的动力学特性。关于喷嘴雾化对喷嘴流量脉动响应特性的实验研究,有两个关键技术,一是喷嘴流量脉动的激励技术,二是关于出口响应特征的测量技术。Wilson^[5-6]和 Bazarov^[7]对产生脉动的流量脉动器做了详细的介绍。富庆飞^[8-9]实验测量了喷嘴出口处的液膜厚度,发现液膜厚度脉动频率与来流频率保持一致,随着频率的增加液膜厚度的脉动幅值减小。Khil^[10]实验测量了流量脉动情况下喷嘴出口处的液膜厚度、压力和轴向速度等参数,发现液膜厚度的响应与其他参量存在相位差。Kim^[11]实验发现在低供油压力下,流量脉动可以促进液膜表面波的发展,促进液膜破碎,对雾化产生有利影响。上述实验研究主要研究了流量脉动对喷嘴出口压力、液膜厚度等参数的响应,而对于喷嘴出口下的液滴破碎过程、喷雾张角及液滴速度分布特性还少有研究。

本文通过建立燃油喷嘴流量脉动激光可视化实验台,考察等流量条件下脉动频率变化对雾化流场的影响,利用高频激光粒子图像速度仪对喷嘴流量脉动情况下雾化过程进行分析,研究流量脉动频率对喷嘴雾化过程影响及液膜作用机理。

1 实验系统

1.1 燃油喷嘴流量脉动激光可视化实验台

燃油喷嘴流量脉动激光可视化实验台如图1所示。实验台由脉动流量激励系统、脉动压力测量系统和PIV测量系统组成。脉动流量激励系统包含流

量脉动控制器和流量控制器,用以产生一定频率的脉动流量。脉动压力测量系统包含压力脉动传感器和压力脉动采集装置,用以对产生的流量脉动效果进行校验。实验采用带有出口扩张段的离心式压力雾化喷嘴,喷嘴由燃油进口段、旋流槽、旋流腔和喷嘴出口扩张段4部分组成。

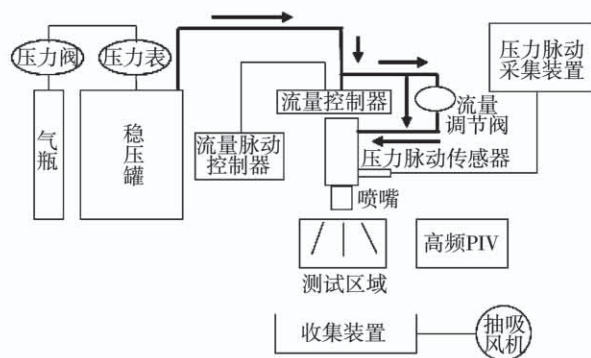


图1 可视化流量脉动雾化实验台

Fig. 1 Visualization flow pulsation atomization test bench

1.2 PIV 测量系统

利用丹麦 Dantec 公司高频 PIV 测量系统对喷嘴中心截面的雾化过程进行拍摄。该系统包括泵浦激光器、CCD 相机、同步控制器和 PIV 系统的控制处理软件。试验采用双谐振脉冲式 Nd:YFL 激光,型号为 Vlite-Hi-30K。输出激光为波长 532 nm 的绿光,激光厚度 1 mm。试验采用的 CCD 相机分辨率为 1 280 × 800 像素,最大拍摄频率是 7 400 Hz。采用双帧拍摄的模式,相机和激光器通过同步控制器进行同步,拍摄频率选取为 1 000 Hz,实验过程中对每个工况进行 1 000 次拍摄。

1.3 燃油流量的脉动控制

流量脉动由流量脉动控制器和流量控制器控制。压力脉动传感器测量流入喷嘴的液体的脉动压力,用来反映瞬态流量特性。图2给出了 0.6 MPa 压力,50 Hz 的工况下控制信号和脉动压力的对应情况。其中,控制信号值为 1 表示流量脉动控制器的信号使流量控制器处于开启状态,控制信号值为 0 表示流量脉动控制器的信号使流量控制器处于关闭状态。喷嘴流量本身存在不规则脉动,通过实验台的流量脉动控制系统实现了一定脉动频率的控制。

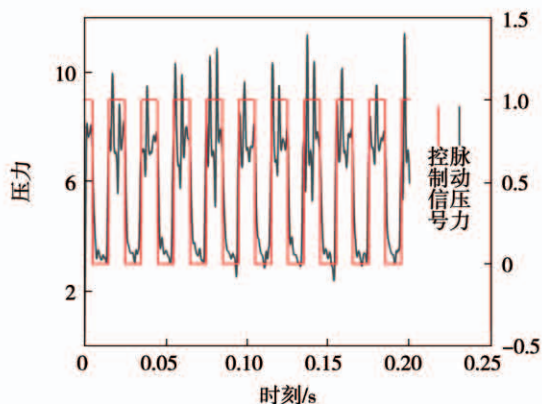


图2 压力脉动特性

Fig.2 Pressure pulsation characteristic

1.4 雾化液滴瞬态速度的测量

实验采用带有出口扩张段的离心式压力喷嘴,燃油经燃油进口段、旋流槽、旋流腔和喷嘴出口扩张段进行雾化,其雾化过程如图3所示。有3个典型阶段:(1)带状液膜区,液体在喷嘴出口形成带状液膜;(2)液膜失稳区,液膜向下游发展失稳破碎;(3)雾化液滴区,破碎后的液膜形成液滴。分别设置位于带状液膜区、液膜失稳区和雾化液滴区的监测点监测对应位置的速度变化情况,如图10所示。试验通过高频PIV对每个工况在1000 Hz的拍摄频率下,拍摄了1000帧雾化图像,通过处理得到了3个监测点处的速度信息。对时序的速度信息进行快速傅里叶变换得到监测点处速度的频域特征,由此得到雾化液滴的瞬态速度的响应特性。

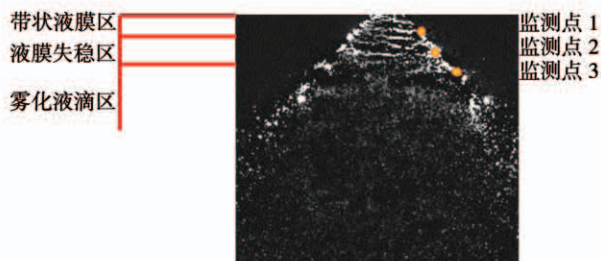


图3 雾化区域划分及监测点位置示意图

Fig.3 Atomization zone division and position of monitoring points

1.5 实验工况

实验在常温常压的条件下进行,通过气瓶和稳压罐控制流入喷嘴液体的压力,分别为0.4、0.5、0.6和0.7 MPa,对每个测试压力,通过高频PIV测

量不施加流量脉动和流量脉动频率分别为10、25、50、62.5、83.3和100 Hz时的雾化过程,共28组实验工况。其中,对于不施加流量脉动的情况,将其脉动频率记为0 Hz。

2 实验结果

2.1 喷嘴流量特性

流量脉动情况下喷嘴的雾化受两方面因素的影响:一是流经喷嘴的平均流量;二是喷嘴的流量脉动频率。通过质量流量法测量不同脉动频率时流经喷嘴的液体流量,结果如图4所示。在实验测试压力下,随着流量脉动频率的增加,流经喷嘴的流量基本保持不变。在测试的流量脉动频率范围内,流量最大有5%的变化,可以认为在实验测试范围内实现了流量不变的控制效果。

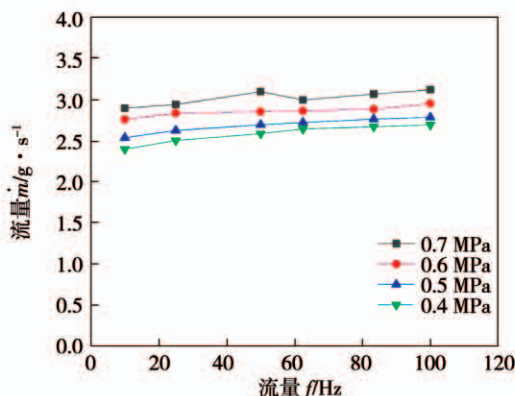


图4 流量脉动下喷嘴流量特性

Fig.4 Flow characteristic of nozzle under flow pulsation

2.2 流量脉动对液膜破碎过程的影响

压力雾化喷嘴的雾化实际上是喷嘴出口处的液膜失稳破碎的过程,在流量脉动的情况下这一过程将发生变化。从喷嘴出口处到液膜失稳破碎的带状液膜区的长度是衡量喷嘴雾化过程的一个特征参量。图5表示了在100 Hz频率下的一个脉动周期内喷嘴雾化过程,其中带状液膜区的长度随流量脉动而周期性变化。这种变化促进了液膜表面波的发展,促进了液膜的破碎,对雾化产生了积极的影响。6 ms时带状液膜区向下发展,在整个脉动周期内有最大的带状液膜区面积,相对于其他时刻,雾化液滴更加密集,在整个区域中心也有比较密集的分布,雾化更加均匀。

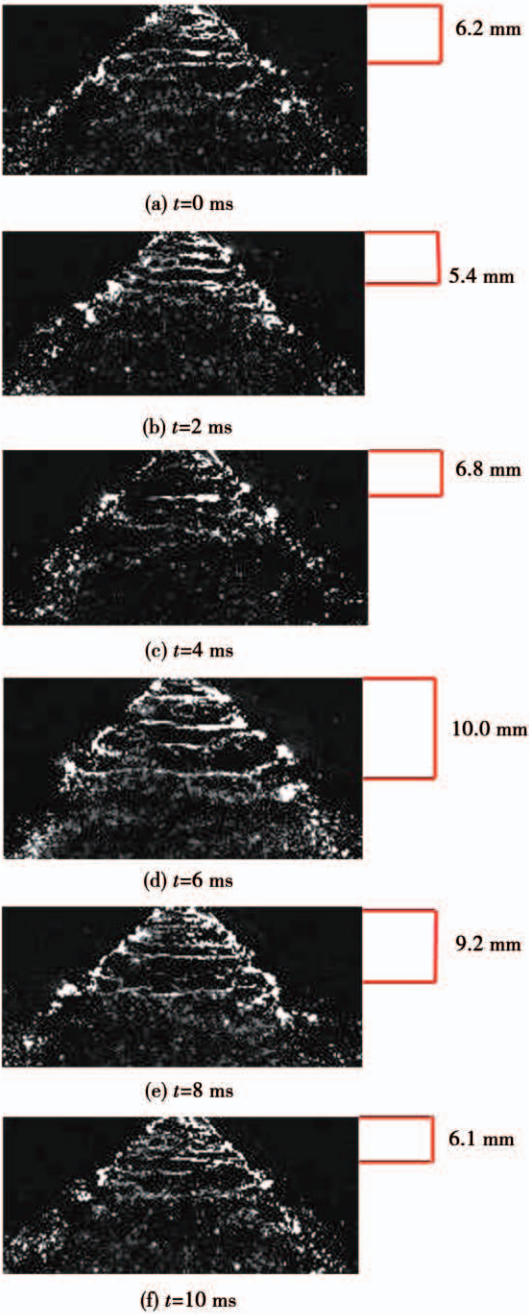


图5 雾化压力 0.7 MPa,流量脉动频率 100 Hz
下雾化过程

Fig.5 Atomization process at pressure of 0.7 MPa
and flow pulsation frequency of 100 Hz

2.3 脉动频率对液滴速度场的影响

2.3.1 平均速度场

燃油经喷嘴形成雾化液滴的速度场影响燃料在燃烧室内的燃烧效率。在流量脉动的情况下雾化液滴的平均速度场也会发生变化。利用高频 PIV 得到不同流量脉动频率下雾化液滴的平均速度场。定义沿喷嘴流动方向为轴向,与喷嘴流向垂直的方向为

径向,图 6 和图 7 分别给出了不同流量脉动频率下喷嘴的轴向速度场和径向速度场。

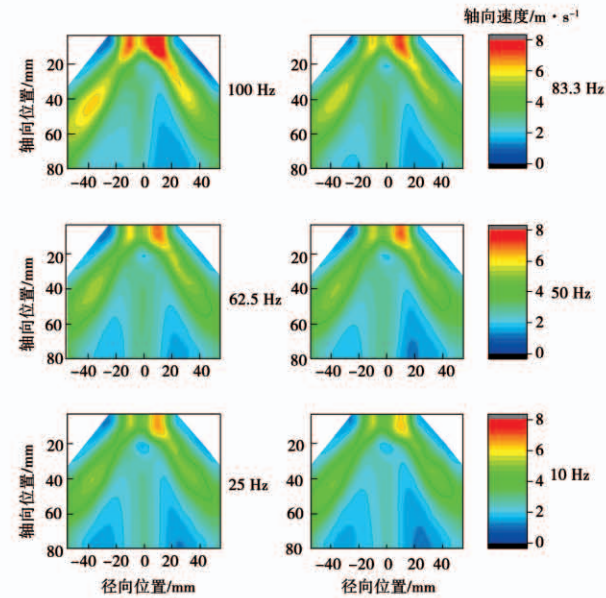


图6 轴向速度场
Fig.6 Axial velocity field

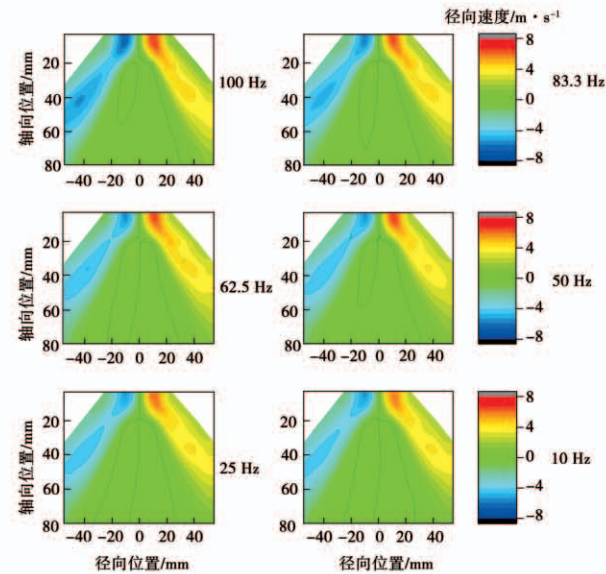


图7 径向速度场
Fig.7 Radial velocity field

在无流量扰动情况下,速度场保持良好的对称性,液滴速度场的对称性没有遭到破坏。另外,随着流量脉动频率的增大,雾化边缘处的速度也随之增大,速度较大区域面积增加。为了衡量这种变化趋势,通过积分法得出轴向速度大于 5 m/s 区域的面积和径向速度大于 4 m/s 的区域的面积,具体结

果如图 8 所示。

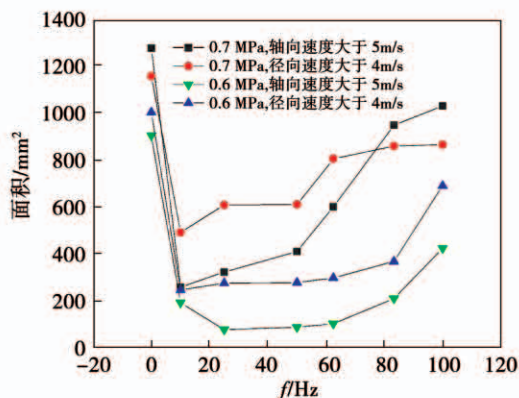


图 8 高速度雾化区域面积随流量脉动频率的变化

Fig. 8 Variation of high velocity atomization area with flow pulsation frequency

相对于未施加流量脉动,施加流量脉动情况下的雾化区域的速度有所降低;随着脉动频率的增加,雾化区域的整体速度也随之增加;在 0.7 MPa 实验工况下,脉动频率从 10 Hz 增加到 100 Hz,轴向速度大于 5 m/s 区域的面积有 4 倍左右的增加,这说明流量脉动对整体雾化的液滴速度场的影响明显。

2.3.2 瞬态速度

图 9 给出了监测点 3 在 7 MPa 压力下不同流量脉动频率的轴向速度的 FFT 变换示意图。一方面,其各工况下的主频特征明显,且与流量脉动的频率保持一致,说明喷嘴上游的流量脉动传递到速度场上,使速度场也表现出对应的脉动特征。另一方面,快速傅里叶变换后主频的幅值代表对应工况下流量脉动的强弱。所有实验工况下 3 个监测点处的轴向速度和径向速度均满足这一特征。

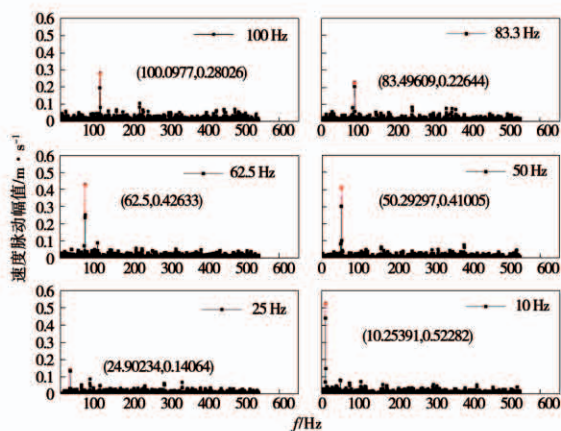


图 9 监测点 3 轴向速度的 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of axial velocity at point 3

图 10 给出了 0.4 MPa 压力下 3 个监测点在不同流量脉动频率下轴向速度主频幅值的比较。虽然不同频率下脉动主频幅值存在不同,但随着监测点向下游发展,速度脉动幅值也随之衰减。在 50 Hz 时,脉动幅值具有最大值。实际上,上游燃油流量脉动向下游传递时存在延迟,在流量脉动频率较低时,脉动周期大于延迟时间,随着脉动频率的增加,下游速度的脉动幅值随之增大,而脉动频率达到一定值后,脉动周期小于延迟时间,随着脉动频率的增大,下游速度脉动幅值随之减小。

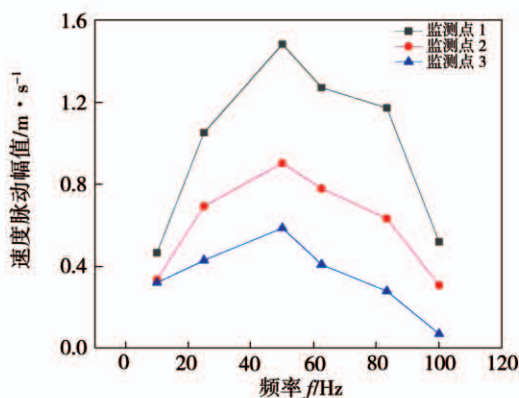


图 10 0.4 MPa 雾化压力下各监测点速度脉动幅值随流量脉动频率的变化

Fig. 10 Variation of velocity amplitude with flow pulsation frequency at each monitoring point under 0.4 MPa atomization pressure

3 结 论

(1) 喷嘴流量脉动影响压力雾化喷嘴液膜的破碎,进而对整个雾化过程产生影响。在实验工况下,流量脉动促进液膜表面的发展,促进液膜的破碎,雾化更加均匀。

(2) 喷嘴流量脉动向下游传递,下游的雾化过程产生对应的响应特性。流量脉动情况下压力雾化喷嘴的带状液膜区的的变化主频和雾化液滴的瞬态速度的变化主频,与喷嘴的流量脉动频率保持一致。带状液膜区的长度随流量脉动频率周期性变化。

(3) 喷嘴流量脉动影响液滴的平均速度场,进而影响整体的雾化效果。随着喷嘴脉动频率的增加,液滴平均速度场高速区域的面积增加。0.7

MPa 压力下脉动频率从 10 Hz 增加到 100 Hz,轴向速度大于 5 m/s 区域的面积有增加 4 倍左右。

(4) 喷嘴流量脉动影响下游液滴速度脉动幅值,在 50 Hz 处存在极值。在燃油喷嘴工作过程中,可以通过对燃油喷嘴施加燃油流量脉动,保证总的燃油流量不变的情况下,改变热释放的波动情况,进而对燃烧室内存在的热声振荡进行控制。

参考文献:

- [1] COHEN J M, ANDERSON T J. Experimental investigation of near-blowout instabilities in a lean, premixed step combustor [C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA; AIAA, 1996.
- [2] 张自来, 杜世强, 葛冰, 等. 声音信号在贫油预混预蒸发振荡燃烧分析中的应用 [J]. 动力工程学报, 2018, 38 (2): 114 - 119.
ZHANG Zi-lai, DU Shi-qiang, GE Bing, et al. Application of sound signal in the analysis of low-oil premix pre-evaporative oscillatory combustion [J]. Journal of Power Engineering, 2018, 38 (2): 114 - 119.
- [3] 柳伟杰, 葛冰, 田寅申, 等. 预混多喷嘴火焰自激振荡燃烧的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38 (3): 672 - 677.
LIU Wei-jie, GE Bing, TIAN Yin-shen, et al. Experimental study on premixed multi-nozzle flame self-excited oscillating combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38 (3): 672 - 677.
- [4] BAZAROV V. Liquid Injector Dynamics [M]. Moscow: Mashinostroenie, 1979.
- [5] MATTHEW W, DAVID L, MARLOW M. Experimental pulsator characterization for liquid injector research [R]. AIAA, 2009: 5491.
- [6] MATTHEW W, DAVID L, MARLOW M. Experimental pulsator characterization for liquid injector research [R]. AIAA, 2010: 7011.
- [7] BAZAROV V, LEE E, LINEBERRY D, et al. Pulsator designs for liquid rocket injector research [R]. AIAA, 2007: 5156.
- [8] FU Q F, YANG L J, WANG X D. Theoretical and experimental study of the dynamics of a liquid swirl injector [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26 (1): 94 - 101.
- [9] FU Q F, YANG L, QU Y Y, et al. Geometrical effects on the fluid dynamics of an open-end swirl injector [J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27 (5): 929 - 936.
- [10] KHIL T, CHUNG Y, BAZAROV V G, et al. Dynamic characteristics of simplex swirl injector in low frequency range [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28 (2): 323 - 333.
- [11] KIM H, LAI M-C. Effect of pressure pulsation on performance of airblast atomizer and micro-machined fuel injectors [R]. AIAA, 2002: 4227.

(丛敏编辑)