# 液体火箭发动机背压振荡环境下的 雾化特性研究进展<sup>\*</sup>

李佳楠1, 雷凡培2, 周立新1, 杨岸龙1

(1. 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;2. 中国船舶工业集团有限公司,北京 100044)

摘 要: 为加深对背压振荡环境下雾化特性的认识,针对在液体火箭发动机中广泛应用的气液同轴 直流式喷嘴、撞击式喷嘴与离心式喷嘴,综述了背压振荡环境下单束液体射流、气液同轴射流、射流撞 击以及旋流雾化特性的研究进展,总结了背压振荡影响雾场的主要作用机制,阐述了以往研究中存在的 一些问题以及需要突破的若干关键技术难题。通过综述可知,背压振荡主要通过两个方面影响雾场:一 是通过改变喷注压降影响喷射,继而影响雾化过程; 二是通过振荡的气相流场直接作用于雾场。背压振 荡环境下的雾化研究仍需要开展大量工作,且需要突破以下几个技术难点: 在试验方面,需要设计可以 产生高频率、高幅值压力振荡的反压舱装置,同时对雾场的干扰要降到最小;发展先进的光学诊断方 法,可以用于反压舱内雾场信息的提取;在数值模拟方面,需要开展雾化过程的高精度数值模拟,同时 研究压力波的产生、发展及演化过程,在这两点基础上研究背压振荡与雾场的相互作用。

关键词:液体火箭发动机;背压振荡;雾化特性;燃烧不稳定;Klystron效应 中图分类号:V434 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2019) 11-2401-19 DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 180779

## **Recent Advances of Atomization Characteristics under Oscillating Backpressure Conditions in Liquid Rocket Engines**

LI Jia-nan<sup>1</sup>, LEI Fan-pei<sup>2</sup>, ZHOU Li-xin<sup>1</sup>, YANG An-long<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;
 2. China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100044, China)

**Abstract**: In order to acquire a better understanding of atomization characteristics under oscillating backpressure conditions, as to gas liquid shear coaxial injector, impinging jet injector and swirl injector that are widely used in liquid rocket engines, the present study reviews recent advances of atomization characteristics of a single liquid jet, gas liquid shear jet, impinging jets, and swirling flow under oscillating backpressure conditions. The main action mechanism of backpressure oscillations on atomization is summarized. Also some problems that existed in previous studies and the key technology that needs breaking through are interpreted. By the review it is concluded that oscillating backpressure affects the atomization field mainly by two ways. One way is to change pressure drop to influence injection thus to affect the atomization process. The other way is to affect atomization di-

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-01-20。

基金项目:国家重大基础研究项目(613193)。

通讯作者:李佳楠,博士生,研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧。E-mail: 2008nwpu@163.com

引用格式: 李佳楠, 雷凡培, 周立新, 等. 液体火箭发动机背压振荡环境下的雾化特性研究进展[J]. 推进技术, 2019, 40 (11):2401-2419. (LI Jia-nan, LEI Fan-pei, ZHOU Li-xin, et al. Recent Advances of Atomization Characteristics under Oscillating Backpressure Conditions in Liquid Rocket Engines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40 (11):2401-2419.)

rectly by oscillating gas field. Plenty of work still needs to be done to study atomization characteristics under oscillating backpressure conditions while some technical difficulties below should be overcome. As for the experiments, backpressure capsule that can generate high-amplitude and high-frequency oscillating backpressure is demanded. At the same time, the disturbance to the atomization field should be at the least. Advanced optical diagnostic apparatus is demanded to acquire atomization field information in the backpressure capsule. As for the simulation, high-fidelity numerical simulation of atomization should be carried out. Also the generation, development, and propagation of pressure wave should be studied. The interaction between oscillating backpressure and atomization field should be investigated based on the two points mentioned above.

Key words: Liquid rocket engines; Backpressure oscillations; Atomization characteristics; Combustion instability; Klystron effect

Mr.	E.	+
忊	ᠴ	衣

р	Pressure	A	Amplitude
t	Time	f	Frequency
τ	Time delay	Н	Distance from injection plane
m	Mass flow rate	Т	One cycle
D	Droplet diameter	$\mu$	Flow rate coefficient
Q	Heat release rate	$\Delta t$	Sampling time interval
x	Cartesian coordinate for axial direction	$\Delta p$	Pressure drop
z	Transverse coordinate	g	Grayscale intensity
и	Axial velocity	() 32	Sauter mean diameter
w	Transverse velocity	( ) <sub>g</sub>	Gas phase
ETF	Evaporation transfer function	$()_{1}$	Liquid phase
FTF	Flame transfer function	() <sub>RR</sub>	Rosin-Rammler
ATF	Atomization transfer function	() <sub>M</sub>	MMH, Monomethylhydrazine
Y	Acoustic admittance	() <sub>N</sub>	NTO, Nitrogen tetroxide
ρ	Density	() <sub>p</sub>	Pressure related
d	Jet diameter	Ô	Complex amplitude
$\theta$	Half impingement angle	$\overline{()}$	Mean value
λ	Wavelength	()'	Fluctuation

引 1 言

燃烧不稳定问题是液体火箭发动机研制过程中 经常遇到的重大技术问题<sup>[1]</sup>,当发生燃烧不稳定时, 燃烧室的压力会产生高频振荡,振幅达到稳态室压 的 10%~100%, 振荡频率从数百 Hz 到 15000Hz 以 上<sup>[2]</sup>,对整个发动机系统造成毁灭性打击<sup>[3-4]</sup>。由于 燃烧不稳定具有非常高的复杂性,极强的非线性以 及随机性<sup>[2,5-6]</sup>,对它的认识还是不够深刻。目前学术 界存在一种观点,认为燃烧不稳定起源于燃烧室中 声学压力振荡与燃烧释热之间的相互作用[7],热声耦 合的反馈循环如图 1<sup>[7]</sup>所示:释热波动引起燃烧室中 的背压振荡,对流动与掺混过程造成影响,振荡的压 力流场又进一步影响热释放,形成封闭的反馈 循环。



Fig. 1 Thermoacoustic feedback cycle<sup>[7]</sup>

Acoustic

oscillations

Flow/mixture

oscillations

图 2<sup>[8]</sup>列出了有可能激发与维持振荡燃烧的一些 子过程,在这些子过程中,雾化通过改变液滴尺寸分 布对非稳态燃烧释热产生重要影响。大量研究表 明,推进剂的雾化与燃烧不稳定有着非常重要的联 系[5-6,9-16],在背压振荡的作用下,雾化特性将会发生 显著变化,其中某些雾化特性参数的变化可能起到 放大器的作用,成为正反馈机制的关键。燃烧不稳

定机理的揭示需要对背压振荡环境下的雾化特性开展深入研究,充分掌握雾化的非稳态特性。



Fig. 2 Driving mechanisms of thermoacoustic instabilities<sup>[8]</sup>

另外,Rayleigh 准则<sup>[17]</sup>指出,当非稳态释热与压 力波动同相位时,压力振荡就会加强,而相位相反 时,压力振荡就会削弱,因此对喷雾燃烧各个子过程 相位关系的研究也就非常重要。由图3可以看出,从 压力振荡开始到最终的非稳态热释放,有许多中间 环节,每个环节都会产生一定的滞后相位,最终非稳 态释热是否与压力振荡同相位就取决于这些中间环 节,其中一个非常重要的环节就是雾化对背压振荡 响应引起的时滞,这在非稳态雾化特性的研究中也 应得到足够的重视。通过控制雾化与燃烧过程的相 位关系,可以实现对燃烧不稳定的主动控制,部分研 究人员已经通过调节雾化过程实现了燃烧不稳定的 主动控制<sup>[18-21]</sup>。



Fig. 3 Time delay between unsteady heat release and intermediate processes affecting the heat release

背压振荡通过影响雾化进而影响燃烧可以进一步由图 4<sup>[14]</sup>来详细阐释。设定衡量雾化性能的指标为燃料与氧化剂的平均直径  $\hat{D}_{RR,M}$  与  $\hat{D}_{RR,N}$ ,背压振荡影响雾化,即影响液滴平均直径,主要是通过两条途径来实现,一是通过改变喷嘴出口压力  $\hat{p}$ 影响喷注压降,引起喷射速度  $\hat{u}_{N}$  与  $\hat{u}_{N}$  的变化,喷射速度的变化对

一次雾化产生影响;二是通过引起气相速度 $\hat{w}$ 与 $\hat{u}$ 的 振荡,从而借助气液相互作用对雾化产生直接影响。 周期性振荡的压力流场引起雾化的周期性变化,从 而导致液滴粒径 $\hat{D}_{RR,M}$ 与 $\hat{D}_{RR,N}$ 的周期性变化,液滴粒 径的周期性变化又会直接导致蒸发速率 $\hat{m}_{M}$ 与 $\hat{m}_{N}$ 的 周期性变化,最终引起燃烧释热 $\hat{Q}$ 的周期性变化,燃 烧释热的周期性变化又会对压力波的传播产生影 响,整个过程如果形成正反馈机制就会激发起燃烧 不稳定。



Fig. 4 Influence of acoustic fields on atomization, evaporation and dynamic heat release<sup>114]</sup>

背压振荡环境下雾化特性的研究也主要是根据 图 4 给出的两条路径开展的。一是研究背压振荡与 喷射的耦合过程,即背压振荡通过改变喷注压降影响 喷射速度,这被称作速调管效应(Klystron effect)<sup>[5,22]</sup>。 文献[5]最早提出了射流喷射过程的速调管效应 (Klystron effect),如图 5<sup>[5]</sup>所示,当喷射速度周期性变 化时,运动速度较快的液体就会追击运动速度较慢 的液体,从而使流体射流出现堆积现象,这种现象可 以使下游位置的正弦形流量转变为抖峰波形。二是 研究声学压力扰动对雾化的直接作用,通过声学驱 动装置产生振荡的压力流场,研究声学扰动条件下 射流或液膜的破碎过程。

以往对于雾化特性的研究主要是在恒定压力条件下开展的,背压振荡环境下雾化特性的研究虽然也开展了部分工作,但与稳态的雾化特性相比还是

相对有限,并且这些工作还没有得到系统的总结,制 约了对非稳态雾化特性的深入理解及对燃烧不稳定 机理的深入认识,这项工作亟需开展。针对液体火 箭发动机中广泛应用的气液同轴直流式喷嘴、撞击 式喷嘴与离心式喷嘴,其结构示意图分别如图6(a), (b),(c)所示<sup>[23-25]</sup>,对背压振荡环境下的单束液体射 流、气体同轴射流、射流撞击以及旋流雾化特性的研 究进展进行了系统综述,以加深对背压振荡环境下 雾化特性的认识,找出以往研究中存在的问题以及 需要重点突破的一些关键技术难题,为该领域的进 一步研究指明方向。



#### 2 背压振荡对射流雾化的影响

#### 2.1 背压振荡对单束液体射流雾化的影响

单束液体射流在液体火箭发动机推力室中非常 常见,对射流的研究是研究更为复杂结构喷嘴雾化 的基础。Rayleigh<sup>[26]</sup>最早对单束射流的雾化机理开 展了研究,之后相关研究人员针对射流破碎开展了 大量的理论分析[27-29]、数值模拟[30-34] 与试验研 究[35-37],对射流雾化有了较为深刻的认识,射流破碎 是多种因素共同作用的结果,本文重点关注纵向与 横向背压振荡条件下射流的雾化特性。

当沿射流轴向出现纵向的背压振荡时,喷嘴出

口的质量流量会发生动态变化,质量流量的动态变 化对射流破碎会产生重要的影响。试验方面,多采 用机械扰动装置对前端压力施加扰动研究流量振荡 对于射流雾化的影响。Crane等<sup>[38]</sup>, McCormack等<sup>[39]</sup> 设计了机械扰动装置,研究了前端压力扰动对射流 破碎的影响,建立了扰动频率、幅值与射流破碎长度 的关系,对低速射流破碎的Rayleigh分析作了改进, 发现在强迫扰动的作用下,低速射流破碎机理由表 面张力主导向 Klystron 效应主导转变。Chigier<sup>[40]</sup>应 用压电式驱动装置对射流前端施加扰动,同样也发 现了 Klystron 效应, 射流速度的周期性变化导致射流 形态出现圆盘状的结构,在射流本征频率附近的扰 动能增加液滴尺寸的均匀性,试验拍摄到的前端扰 动条件下的射流形态如图7所示。

除了在射流前端施加扰动之外,也可以应用声 学扰动装置对射流轴向施加扰动,这种施加扰动的 方式与实际物理过程更为接近,但是扰动的幅值、频 率受到一定限制。Miesse<sup>[41]</sup>在管道内通过扬声器对 射流施加轴向的声学扰动,研究了纵向声学振荡对 射流雾化的影响,如图8<sup>[41]</sup>所示,结合理论分析,作者 认为轴向的压力振荡会导致射流下游出现液滴聚合 的现象,并且射流的破碎长度将会减小,如图9<sup>[41]</sup>所 示。作者认为当射流速度低于某一临界值时,这种 现象的出现可能会激发起燃烧不稳定。

在理论分析方面, Heister等<sup>[42]</sup>采用边界元方法 (BEM)研究了气体纵向振荡条件下的射流过程,纵 向扰动会使射流速度发生周期性变化,扰动条件下 的射流速度表达式为

$$u = 1 + u \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

周期性扰动的速度会导致射流形成 Klystron 效 应,通过不同频率的扰动速度分析发现,射流对其本 征频率处的扰动响应最强。对于低速射流而言,增 大扰动频率和扰动幅值会使得辅助液滴的尺寸增 加,主液滴的尺寸减小,射流破碎长度减小。在比较



(a) Gas liquid coaxial jet injector<sup>[23]</sup>

(b) Impinging jet injector<sup>[24]</sup> Fig. 6 Schematics of three types of injectors

高的扰动幅值作用下,射流会形成蘑菇形的结构,如 图 10<sup>[42]</sup>所示,图中时间为无量纲化。这种结构的形 成将会使液滴的平均尺寸减小,雾化性能提高。

近些年来,直接数值模拟开始应用于雾化特性的研究。Srinivasan等<sup>[43-44]</sup>基于 OpenFOAM,应用



Fig. 7 Patterns of jet with inlet velocity perturbation<sup>[40]</sup>



Fig. 8 Effects of axial acoustic perturbation on jet atomization<sup>[41]</sup>



Fig. 9 Droplet configuration due to coalescence<sup>[41]</sup>



Fig. 10 Jet behavior under violent oscillation<sup>[42]</sup>

VOF方法与 CICSAM 界面重构技术实现了射流破碎的数值模拟,通过在射流入口给定正弦的扰动速度,研究了射流平均速度以及速度扰动的频率、幅值对射流破碎的影响。计算捕捉到了射流发展过程中的一些非线性动力学特征,比如表面波的发展以及液 丝与涡结构的相互作用等,如图 11<sup>[43]</sup>所示。数值模 拟研究表明,在相同的 Strouhal 数下速度扰动振幅对 射流破碎产生显著影响,增加振荡振幅和频率都能 够增大射流的喷雾锥角,计算结果如图 12<sup>[43]</sup>所示,图 中 0.2,0.3,0.4为相对幅值。



Fig. 11 Modulated jet and vortex structures<sup>[43]</sup>



Fig. 12 Contour plot of liquid volume fraction<sup>[43]</sup>

Yang等<sup>[45]</sup>基于开源程序 Gerris<sup>[46-47]</sup>,应用 VOF方 法与网格自适应加密技术,通过在射流入口给定随 时间正弦变化的喷射速度,研究了低速与高速条件 下,扰动频率、幅值对于射流雾化的影响。对于低速 射流而言,扰动导致射流形成明显鼓包,与试验观察 到的现象一致。对于高速射流而言,数值计算发现 雾化对网格的依赖程度很高,只有当网格足够密时 才能精确捕捉到液体的破碎过程。对于低频与中频 扰动而言,随着扰动频率的增大,未受扰动的射流长 度将会减小,液滴平均粒径将会增大。对于高频扰动而言,雾化特性参数则变化较小,表明射流对高频扰动的响应不敏感。另外,扰动幅值对于液滴数目以及液滴粒径具有重要影响,扰动幅值增大,液滴数目将会增大,而液滴平均粒径将会减小。高频扰动下,不同扰动频率与扰动幅值下的射流形态如图13<sup>[45]</sup>所示,图中f为无量纲频率。

以上介绍的是射流雾化对纵向背压振荡响应的 研究进展,除了纵向扰动之外,横向扰动对射流破碎 也将产生重要影响。类比蒸发速率,Heidmann等<sup>[48]</sup> 定义了射流雾化速率,研究了行波、驻波与径向波形 式的横向声学扰动对于射流雾化速率的影响,提出 了与压力振荡相关联的雾化速率扰动因子,分析了 压力振荡对于射流破碎时间的影响,结果表明射流 雾化动力学会显著影响火箭发动机燃烧室的稳定 性。Heister等<sup>[42]</sup>采用边界元方法(BEM)研究了气体 横向扰动对射流的影响。经过理论推导发现,对于 横向扰动而言,射流截面将会发生变形,如图14<sup>[42]</sup>所 示,图中x,z,t为无量纲化。并且在其本征频率处的 响应最强,这种现象可以用来解释 F-1 发动机中遇到 的切向不稳定问题。在试验研究方面, Miesse<sup>[41]</sup>通过 在垂直于射流方向施加声学激励的方法研究了横向 声学扰动对于射流破碎的影响,试验拍摄到的射流 形态如图 15<sup>[41]</sup>所示,结果表明声学扰动使射流破碎 长度减小,同时射流在下游发生明显变形,在空间的 分布发生显著变化。结合理论分析发现,提高喷注 压降以及增大扰动频率,将会减小背压振荡对射流

的影响,表明射流对高频扰动不敏感,增加喷注压降 将提高射流稳定性。

对于横向扰动而言,喷嘴可能位于压力扰动的 波腹或者波节的位置,如图 16<sup>[7]</sup>所示,对于驻波而言, 压力扰动波波腹即为速度扰动波波节,压力扰动波 波节即为速度扰动波波腹。Vorob'Ev<sup>[49]</sup>研究了无粘 液膜射流在另一种无粘气体声学振荡条件下的不稳 定性,结果表明液膜的破碎受液膜与声压波腹、波节 的相对位置影响很大。Hoover等<sup>[50]</sup>在Kundt管里观 察了横向声学扰动对于射流的影响,发现当射流位 于声学压力波节的时候,射流的变形、破碎会发生明 显的变化。

采用同样的方法, Carpentier 等<sup>[51]</sup>在 Kundt 管中 开展了射流的声学扰动试验,研究了横向声学扰动 对于圆柱液体射流破碎的影响, Kundt管的结构示意 图如图 17<sup>[51]</sup>所示, 管道一端安装扬声器作为声源, 在 管道内形成稳定的声波, 另一端安装传声器用来接 收声源发出的声信号, 中间设置观察窗对雾场进行 观测。试验发现当射流位于速度波节的时候, 射流 没有发生明显变化。当射流位于速度波腹时, 横向 声学扰动下的射流要么偏离轨道, 要么在空间发生 变形, 并形成连续的波瓣, 当声学扰动速度足够高 时, 射流变形将会增加到一定程度导致雾化, 如图 18<sup>[51]</sup>所示。作者应用模态分析解释了横向声场作用 下的射流振荡, 当射流置于声场作用下时, 将会激发 两种射流本征模, 其中一种模态复现了波瓣的形成



(e) U'=10%, f=12

(f) U'=20%, f=12

Fig. 13 Snapshots of the jet atomization under different perturbation frequencies and amplitudes<sup>[45]</sup>

种模型的三维扩展,为构建更为符合实际物理过程的模型打下了基础。



Fig. 14 Column shapes at various times of an acoustic perturbation<sup>[42]</sup>



Fig. 15 Effects of transverse sound field on jet atomization<sup>[41]</sup>



(a) Pressure anti-node (b) Pressure node

Fig. 16 Jet subjected to transverse pressure fluctuations<sup>[7]</sup>



injector; ⑦ Camera; ⑧ Light sources; ⑨ Window Fig. 17 Schematic of Kundt tube<sup>[51]</sup>

Ju等<sup>[52-53]</sup>在大气开放环境下开展了声场扰动条件下的乙醇与煤油射流雾化试验,应用高速摄影对雾场进行拍摄,应用多阈值图像处理技术分析高频

振荡对于燃料破碎、混合特征的影响。通常情况下, 小液滴更容易跟随振荡压力场一起传播,因此,在声 场的作用下,喷雾倾向于向压力传播的方向运动,如 图 19<sup>[52]</sup>所示。试验发现,声学扰动对于乙醇的影响 比对煤油的影响更大,主要是因为乙醇雾化液滴相 比于煤油雾化液滴尺寸更小,对压力振荡的响应更 加敏感,更容易受到振荡压力流场的影响。



Fig. 18 Deformation and atomization of liquid jets<sup>[51]</sup>



acoustic frequencies<sup>[52]</sup>

通过背压振荡条件下的单束射流雾化研究进展 可以看出,纵向背压振荡使射流表现出明显的 Klystron效应,在横向背压振荡的影响下,射流在形态、破 碎长度、液滴空间分布等方面发生显著变化,射流出 口与压力扰动波的相对位置对射流破碎也会产生 影响。

#### 2.2 背压振荡对气液同轴射流雾化的影响

气液同轴直流式喷嘴主要应用于低温推进剂液 体火箭发动机中,比如氢氧发动机、液氧甲烷发动机 等,美国航天飞机主发动机SSME,欧洲Ariane火箭的 一级发动机Vulcain,以及SpaceX的Raptor发动机中 都应用了这种结构的喷嘴。由于低温推进剂的临界 温度与临界压力相对较低,在发动机中很容易达到 超临界状态,因此背压振荡对这种喷嘴雾化特性影 响的研究需要关注喷嘴的工作状态。

以往的研究多是关注横向声学压力振荡对气液 同轴射流雾化的影响。理论分析方面, Yang 等<sup>[54]</sup>应 用线性稳定性理论,将声学压力振荡等效为气体密度的振荡或者气体速度的振荡,研究了亚临界条件下声学压力振荡对二维气液同轴射流雾化的影响,结果表明,背压振荡使液膜变得不稳定,高速射流条件下背压振荡对液膜的影响小于低速射流下的影响,低频振荡的影响大于高频振荡的影响。数值模拟方面,Gonzalez-Flesca等<sup>[55]</sup>采用大涡模拟的方法研究了跨临界条件下横向声学扰动对圆柱液体射流破碎的影响。当存在横向的声学扰动时,射流破碎长度将会显著减小,并且在声学扰动作用下射流会变成扁平液膜,如图20<sup>[55]</sup>所示。



Fig. 20 Evolution of the iso-density surface during the transient phase number from  $I \sim IV^{(55)}$ 

当喷嘴工作在亚临界状态,且喷嘴位于压力扰 动波波腹位置时,射流破碎主要受到环缝气体非稳 态运动的影响,声学压力扰动的幅值如果高于气流 运动的平均动压,射流破碎就会明显改变。当喷嘴 位于速度扰动波波腹时,局部非线性声辐射压力将 会使射流变为液膜形状,如图21<sup>[56]</sup>所示,液膜的形成 对雾化起到促进作用。由于液体火箭发动机中的喷 嘴很多,背压振荡会使喷雾在空间重新分布,并导致 空间不均匀燃烧,这种情况的出现有可能会激发起 高频燃烧不稳定。当喷嘴工作在亚临界状态时,Davis等<sup>[57-58]</sup>发现气液射流速度比越大时,射流对声学 的扰动响应越弱,因此,可以推断在更高的气液速度 比条件下,发动机工作将会更加稳定。

Graham 等<sup>[59]</sup>研究了亚临界以及近临界条件下, 横向的声学扰动对于气氮/液氮同轴射流的影响,应 用两个压电汽笛产生 0~3kHz的声学扰动,应用高速 摄影对雾场进行拍摄,如图 22<sup>[59]</sup>所示。试验发现当 喷嘴工作在亚临界状态时,声学扰动对射流形态及 射流的破碎产生重要影响,如图23<sup>[59]</sup>所示。当喷嘴 工作在近临界状态时,在某些工况下,射流液核长度 将会减小90%,如图24<sup>[59]</sup>所示。



Acoustic drivers

Fig. 22 Overview of the main chamber<sup>[59]</sup>

Hardi等<sup>[60]</sup>通过液氧射流试验也得出了类似的结论,采用高速阴影图像测量了一阶横向声学扰动模式下液氧射流的完整液核长度,表明没有扰动与存在一阶横向扰动时,液核的破碎机理存在明显区别。 液核长度随着扰动声压或者横向声学速度的提高明显减小,当声学扰动条件接近高频不稳定时,液核长度减小了 30%。液氧液核对于声学扰动的响应特性



Fig. 23 Subcritical coaxial jet images<sup>[59]</sup>



Fig. 24 Nearcritical coaxial jet images<sup>[59]</sup>

对于理解燃烧不稳定的驱动机理具有重要意义。

动态模态分解(DMD)方法是研究非线性系统振 荡特性的一种方法,Hua等<sup>[61]</sup>应用DMD方法对存在 以及不存在声学振荡的气液同轴射流开展了模态分 析,用来辨识不同级别的鲁棒动态模态。通过分析 得到了衰减最快的喷嘴外部流动模态、喷嘴模态、声 学压力驱动下的稳定模态、声学压力驱动的线性响 应模态,以及在观察平面反相振荡的模态,最后一种 模态只出现在气液动量比非常高的时候,同时分析 了气液动量比增大时每一种模态对于流动的影响。

Leyva等<sup>[62]</sup>研究了亚临界、跨临界与超临界条件 下横向声学扰动对气氮/液氮同轴射流的影响,不同 相位角下的射流图像如图 25<sup>[62]</sup>所示,当相位角为 180°时,喷嘴恰好位于压力波腹的位置。从图片可以 看出,相位角从0°变化到180°时,射流发生明显的扭 曲,喷雾扩展角在明显增大,液核长度在逐渐减小。 当相位角从180°变化到360°时,雾化特性参数的变 化规律与0°到180°的变化规律刚好相反。



Fig. 25 Sample images with different phase angles<sup>[62]</sup>

横向背压振荡对气液同轴直流式喷嘴雾化特性 的影响需要考虑喷嘴的工作状态以及喷嘴与压力扰 动波的相对位置,背压振荡主要影响射流形态、液核 长度、喷雾锥角等雾化特性参数。

### 3 背压振荡对液膜雾化的影响

#### 3.1 背压振荡对射流撞击雾化的影响

由于撞击式喷嘴在液体火箭发动机中的应用较 早,稳态条件下撞击式喷嘴的雾化研究较多,早期多 是采用理论分析<sup>[63-66]</sup>与试验研究<sup>[67-70]</sup>的手段,近些年 三维直接数值模拟<sup>[71-74]</sup>也逐渐应用到撞击式喷嘴雾 化过程的研究,对雾化机理及影响雾化的主要因素 有了比较全面的认识。相对于稳态条件下的雾化研 究,撞击式喷嘴动态雾化的研究则相对较少,并且集 中在试验研究方面。

撞击式喷嘴的雾化可以分为三个过程:射流撞 击形成液膜,液膜波动破碎形成液丝,液丝进一步收 缩形成液滴<sup>[75]</sup>。背压振荡首先会对喷注过程产生影 响,通过改变喷注压降使喷注流量发生周期性变化。 参照 Bazarov等<sup>[76]</sup>设计的压力扰动装置,Yang等<sup>[24,77]</sup> 设计了前端压力扰动装置,如图 26<sup>[24]</sup>所示,通过对喷 前压力施加扰动,试验研究了喷射流量变化的 Klystron 效应对撞击雾化的影响。由高速摄影对动态的 雾化过程进行拍摄,编写 MATLAB 程序统计不同区 域的灰度随时间的变化,如图 27<sup>[24]</sup>所示,并开展了频 谱分析与相关分析。试验发现撞击式喷嘴自然雾化 周期性特征并不明显,在强迫扰动作用下,雾化表现 出良好的周期性,强迫扰动下的雾化特性与自然雾 化表现出明显的差别,如图 28<sup>[24]</sup>所示。当压力扰动 的幅值高于 0.1 时,灰度的周期性变化与压力振荡的 周期性变化表现出较强的相关关系,而当压力扰动 的幅值低于 0.01 时,相关关系则相对较弱,压力扰动 幅值的大小对雾化的周期性起到决定作用。灰度变 化与压力扰动之间的相位关系则与扰动幅值关系不 大,相位差主要取决于扰动频率。

针对声学扰动对液膜破碎的影响, Mulmule 等<sup>[78-79]</sup>研究了不同频率以及声学压力量级对于两束



Fig. 26 Schematic of hydro-mechanical pulsator<sup>[24]</sup>



Fig. 28 Grayscale intensity at different pressure fluctuation amplitudes<sup>[24]</sup>

射流 180°撞击形成液膜破碎的影响,试验结果发现 声学压力扰动对于液膜破碎有重要影响,如图 29<sup>[78]</sup> 所示。对于给定的扰动频率,存在对液膜破碎产生 影响的临界声压。当小于临界声压时,声学扰动对液 膜破碎不产生明显影响。随着扰动频率的提高,临界 声压也在提高。当扰动声压一定时,液膜的破碎对于 低频扰动的响应更为明显。测量得到的液滴尺寸随 着响应的提高而减小,液滴脱落的频率与施加的扰动 频率接近。与试验结合,数值求解了压力扰动下等厚 度液膜的无粘运动方程,用来确定系统的线性稳定 性。数值解表明强迫扰动下的最不稳定波长小于不 存在扰动时的波长,对于正对称波形与反对称波形, 耦合发生在最低阶的压力振荡条件下。



(a) In the absence
 (b) In the presence of acoustic wave
 Fig. 29 Photographs of the liquid sheet<sup>[78]</sup>

采用同样的方法,Dighe等<sup>[80]</sup>研究了声学扰动对 两束射流斜撞形成液膜破碎的影响,发现存在声学 扰动时,液膜的波动破碎更加剧烈,液膜的破碎长度 与宽度均会减小,撞击波的波动幅值将会增大,液膜 剥离出的液滴数密度将会增大,如图 30<sup>[80]</sup>所示。随 着扰动频率的增大,液膜产生响应的临界声压将会 增大。对于平滑的液膜而言,主导液膜破碎的机理 由 R-P不稳定向 K-H不稳定转变。声学激励条件下 的液滴脱落频率与激励频率接近,声学激励在不改 变液滴尺寸分布的前提下使得液滴平均粒径显著 减小。

在数值模拟方面,Zhang等<sup>[81]</sup>将压力的振荡等效 为气体密度的振荡,基于开源程序Gerris<sup>[46-47]</sup>,应用 VOF方法与网格自适应技术开展了背压振荡条件下 射流撞击雾化的数值模拟。由于Gerris只能计算不 可压流动,作者将压力的变化等效为气体密度的变 化,参考Santoro等<sup>[82]</sup>的文献,背压振荡采用沿计算域 横向分布的一阶驻波形式,表达式为

$$p' = A_{p} \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{p}}\right) \sin\left(2f_{p}\pi t\right)$$
(2)

假定射流上游压力不变,当压力发生振荡时,射



Fig. 30 Liquid sheet in the absence and presence of acoustic excitation<sup>[80]</sup>

流前后压差也会随着改变,从而影响射流速度,作者 基于稳态条件下射流速度与喷注压降的关系计算了 背压振荡条件下的喷射速度

$$u = \mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \tag{3}$$

采用 MATLAB 对射流所在平面图像进行了灰度 处理,分析了压力扰动频率、幅值对液膜破碎的影 响,计算得到的二维灰度图像如图 31<sup>[81]</sup>与图 32<sup>[81]</sup>所 示。研究表明,当背压振荡的频率接近液膜的固有 频率时,会使液膜的波动增强,波动幅值增大,喷雾 角增大,液膜破碎长度减小,撞击点下游液滴平均粒 径将会减小。作者计算背压振荡条件下的雾化存在 两个问题:(1)压力与速度是耦合在一起的,而压力 等效为密度的变化并不会带来速度的改变,与实际 物理过程不符;(2)喷射速度的计算应该基于喷嘴动 力学相关理论进行计算,而不应直接套用稳态条件 下的计算公式。

背压振荡对于撞击式喷嘴雾化的影响体现在两 个方面:(1)通过影响喷注压降对喷射过程造成影 响,继而通过射流的Klystron效应对雾化产生影响; (2)通过振荡的压力流场对液膜破碎产生直接作用 效应。这两方面对于雾化的周期性、液膜的破碎、液 滴的尺寸分布与空间分布等雾化特性参数都有较大 影响。至于哪种影响占主导地位,需要根据喷嘴的 实际工作状况开展量级分析来确定。

#### 3.2 背压振荡对旋流雾化的影响

液体火箭发动机中除了撞击形成液膜的雾化, 另外一种液膜雾化的方式就是旋流液膜<sup>[25]</sup>的雾化。







Fig. 32 Grayscale contours with different pressure oscillation frequency, and oscillation amplitude is 20%<sup>[81]</sup>

关于背压振荡对离心式喷嘴喷射与雾化的影响,以 往的研究集中在喷嘴动力学领域<sup>[83-85]</sup>,即研究喷嘴出 口质量流量对于振荡压力场的响应特性,背压振荡 对于旋流式液膜破碎的影响研究则相对较少,Fu 等<sup>[86]</sup>通过在供应管路中安装脉动发生装置研究了敞 口离心式喷嘴对供应系统中扰动的响应特性,试验 系统如图 33<sup>[86]</sup>所示,并重点关注了喷嘴入口处的压 力振荡与旋流腔内液膜厚度振荡的相位差,结果表 明相位差随离心式喷嘴特征参数的增大而增大。

与Fu<sup>[86]</sup>的试验方案类似,Yang等<sup>[87]</sup>在前端施加 扰动,研究了流量型振荡的Klystron效应对离心式喷 嘴旋流液膜雾化的影响,通过对高速摄影图像进行 灰度提取,记录了不同位置处的液膜振荡过程如图 34<sup>[87]</sup>所示。分析了液膜雾化的频率响应特性以及与 背压振荡之间的相关关系,研究结果表明周期性的 背压振荡导致周期性的液膜破碎,离心式喷嘴只对 0~300Hz的压力振荡响应较为明显,尤其对100Hz~ 200Hz内响应最大。与撞击式喷嘴相比,离心式喷嘴 在液体火箭发动机可以认为是低通滤波单元,对高 频燃烧不稳定起到很好的抑制作用。

同样是应用前端压力扰动装置,Cheng等<sup>[88]</sup>研究 了前端压力振荡对于旋流液膜雾化的影响,关注了 喷嘴的内部流动过程以及液膜的破碎过程。由背光 阴影技术对喷嘴内部流动以及喷雾过程进行拍摄, 由激光衍射技术对液滴粒径进行测量,并应用特征 正交分解方法(POD)与图像处理方法对结果进行分 析。结果发现内部流动、喷雾以及液滴尺寸将跟随 强迫振动发生振荡。旋流式喷嘴内部流动过程由气 涡的振荡来表征,振荡在喷嘴内部的传播过程被认 为是长波模式。当液膜从喷口流出时,压力峰值导 致液膜变厚,压力最低点导致液膜变薄,并使喷雾由 中空雾锥向宝塔形转变,如图35<sup>[88]</sup>所示,厚液膜的形 成使得液滴数密度提高并使液滴粒径变大。前端压 力扰动对旋流液膜雾化的影响与对射流雾化的影响 相比有所不同,如图36<sup>[88]</sup>所示。对于射流而言,由于 高速流体与低速流体有相同的运动方向,导致高速 流体挤压低速流体形成鼓包。而对于旋流液膜而 言,高速运动液膜的方向会发生改变,因此并没有形 成鼓包。康忠涛等<sup>[89]</sup>也发现 Klystron 效应的出现使 得锥形液膜发生折叠。

Khil等<sup>[90-91]</sup>也设计了喷前压力扰动装置,研究了 喷前压力振荡的Klystron效应对旋流雾化的影响,记 录了喷嘴出口处的压力、液膜厚度、轴向速度、质量 流量与喷雾角等参数的波动,并记录了参数变化与 背压振荡之间的相位差,如图 37<sup>[90]</sup>、图 38<sup>[90]</sup>所示。

Chung等<sup>[92]</sup>使用类似的脉动发生装置,研究了结构参数对敞口离心式喷嘴动力学特性的影响,重点关注了旋流腔出口处液膜的厚度。试验拍摄到的雾场结构如图 39<sup>[92]</sup>所示,结果显示喷嘴出口液膜厚度的振幅正比于供应管路中的压力振荡幅值,但随着旋流腔长度和直径的增大,液膜厚度振荡幅值减小,对于阻止供应系统中流量振荡的传播以及抑制燃烧不稳定的发生都起到有利的作用。

薛帅杰等<sup>[93]</sup>研究了喷前压力脉动对厚液膜敞口 离心式喷嘴雾化特性的影响,使用高速相机获得旋 流腔内流过程和喷注雾化过程对外加扰动的响应特性,如图 40<sup>[93]</sup>所示,记录了旋流腔内以及喷嘴出口处 液膜灰度的变化,如图 41<sup>[93]</sup>所示,g<sub>film</sub>为旋流腔内液 膜的灰度,g<sub>atom</sub>为喷嘴出口处液膜的灰度。研究发 现,供应系统中存在一定频率的扰动时,喷前压力、 旋流腔内流过程和喷注雾化过程的响应频率与扰动 频率基本一致;随着扰动波长缩短,旋流腔内液膜局 部缩口,缩口向下游传播并使喷雾过程出现Klystron 效应。

离心式喷嘴非稳态雾化的研究多是应用前端压 力扰动装置引起喷前压力的脉动,研究喷前压力脉



Fig. 33 Experimental setup<sup>[86]</sup>



Fig. 34 Liquid film edge and film edge fluctuations<sup>[87]</sup>

100

Spray cone angle/(°)

60

1.0

响研究仍存在一些问题:后端压力扰动如何等效为



Time/s Fig. 37 Liquid film thickness with time<sup>[90]</sup>



前端扰动需要进一步探讨,背压振荡对旋流液膜雾 化的直接作用研究亟需开展。

#### 4 评 论

由于不同形式喷嘴的雾化机理不同,其对背压 振荡的响应机理及响应特性也就有所差别。本文所 关注喷嘴的雾化对于背压振荡的响应机理可以分为 两个方面:(1)背压振荡通过引起喷注压降的变化影 响喷射过程,继而影响雾化过程;(2)背压振荡通过 振荡的气相流场直接作用于雾场。以往关于背压振 荡对雾化特性影响的研究也主要是针对这两个方面 开展的:(1)通过扰动装置在前端施加扰动,研究喷 注压降的周期性变化对雾化造成的影响[24,38-40,86-93]; (2)应用声学扰动装置产生声学扰动,研究声学扰动 对雾化的影响[41,59-60,78-80]。通过文献综述发现,背压 振荡对雾化特性影响较大,存在背压振荡时,射流与 液膜的形态、破碎机理、破碎长度、频率特性、液滴的 尺寸分布与空间分布都发生了显著改变,其中的某 些变化可能起到放大器的作用,成为正反馈机制的 关键。未来需要建立燃烧响应模型,进一步研究雾 化特性参数的变化对于燃烧特性的影响。

基于上述两种方法的研究对于深入认识雾化对 背压振荡的响应特性具有重要意义,但基于这两种 方法的研究与实际物理过程存在一定差异。首先, 液体火箭发动机推力室中出现的背压振荡是后端扰 动,后端扰动影响到前端压力需要一个传播过程,也 必然存在一个滞后相位。除此之外,后端压力扰动 对于喷射过程的影响如何等价到前端压力扰动需要 开展动力学特性分析。其次,声学压力扰动是低幅 值的小扰动,只有在喷注压降较低的情况下才会对 雾化过程产生显著影响,对于液体火箭发动机中的 高喷注压降并不适用。

背压振荡环境下的雾化特性研究虽然已经开展 了部分工作,对这一过程有了初步的认识,但是距离 揭示雾化响应机理,全面把握喷雾特性仍有一定差 距,在理论、数值模拟与试验等方面都存在若干关键 技术难题需要突破,需要继续开展大量的研究工作。 试验方面,需要设计可以产生高幅值、高频率的压力 扰动装置,西安航天动力研究所的杨岸龙等[94]应用 周期性进气排气的原理设计了一种高频高幅值反压 振荡雾化实验装置,但是这种方法对雾场干扰较大, 需要优化设计使得进气排气过程对雾场的干扰降到 最小。另外需要发展先进的光学诊断方法可以对反 压舱内的流场进行观测,提取振荡流场中的雾化数 据信息。数值模拟方面需要开展雾化过程的高精度 仿真,同时研究压力波的产生、传播及演化过程,在 此基础上研究振荡的压力场与雾化之间的相互作 用。在对背压振荡环境下的雾化特性开展大量研究 之后,建立并优化背压振荡环境下的雾化模型,作为 初始及边界条件代入到燃烧的计算中,研究周期性 变化的喷雾场对燃烧特性的影响,从而形成闭环,建 立基于雾化扰动机理的燃烧不稳定理论体系。

#### 5 总结与展望

对于单束射流而言,纵向的背压振荡会引起明显的 Klystron效应,横向的背压振荡会对射流形状、破碎长度、液滴的空间分布等雾化特性参数产生影响。横向的背压振荡对于气液同轴射流雾化的影响,需要考虑喷嘴的工作状态以及喷嘴与压力波的相对位置。背压振荡对于射流撞击雾化的影响体现在两个方面:(1)通过影响喷注压降影响喷射,继而影响雾化过程;(2)通过振荡的压力流场对雾场产生直接作用效应。在强迫扰动的作用下,撞击雾化表现出明显的周期性,撞击形成液膜的破碎更加剧烈。离心式喷嘴非稳态雾化特性的研究更多的是采用前端压力扰动的方法,背压振荡如何等效为前端压力扰动需要进一步探讨,后端扰动对于旋流雾化的影响需要进一步开展。

雾化过程对于背压振荡的响应机制还没有被全 面准确地阐释,未来这个方向仍需要开展大量的研 究工作。随着试验测试技术以及光学诊断工具的发 展,试验将会模拟出与发动机实际状况更为接近的 状态,捕获更多的数据信息。雾化过程的三维直接 数值模拟在近些年发展迅速,对于揭示雾化过程对 于背压振荡的响应机理,分析响应特性也将发挥出 越来越大的作用。未来在非稳态雾化特性研究的基 础上可以建立燃烧响应模型,分析动态的雾化对燃 烧特性的影响,进一步揭示非稳态雾化在燃烧不稳 定中所起的作用。

致 谢:感谢国家重大基础研究项目资助。

#### 参考文献:

- [1] 杨立军,富庆飞.液体火箭发动机推力室设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [2] 黄玉辉.液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟 和实验研究[D].长沙:国防科技大学,2001.
- [3] Goy C J, James S R, Rea S. Monitoring Combustion Instabilities: E. ON UK's Experience [M]. USA: American Institute of Astronautics and Aeronautics, 2005.
- [4] Zhou J, Chen W, Wang Y, et al. The Phenomena of Combustion Instability in Bipropellant Rocket Engines Using NTO/Hydrazine-Sorts[C]. Vancouver: 55th International Astronautical Congress, 2004.
- [5] Harrje D T, Reardon F H. Liquid Propellant Rocket Combustion Instability[R]. NASA SP-194, 1972.
- [6] Yang V, Anderson 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.
- [7] O'Connor J, Acharya V, Lieuwen T. Transverse Combustion Instabilities: Acoustic, Fluid Mechanic, and Flame Processes [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 49: 1-39.
- [8] Yang X. Simulation of Atomization Process Coupled with Forced Perturbation with a View to Modeling and Controlling Thermoacoustic Instability [D]. UK: The University of Manchester, 2016.
- [9] Huynh C, Ghafourian A, Mahalingam S, et al. Combustion Design for Atomization Study in Liquid Rocket Engines[R]. AIAA 92-0465.
- [10] Anderson W E, Miller K L, Ryan H M, et al. Effects of Periodic Atomization on Combustion Instability in Liquid-Fueled Propulsion Systems [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 818-825.
- [11] Anderson W E. The Effects of Atomization on Combustion Stability[D]. USA: The Pennsylvania State University, 1996.
- [12] Chao C C, Heister S D. Contributions of Atomization to F-1 Engine Combustion Instabilities [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2004, 28: 1045-1053.
- [13] Giuliani F, Gajan P, Diers O, et al. Influence of Pulsed Entries on a Spray Generated by Air-Blast Injection Device: an Experimental Analysis on Combustion Instability Processes in Aeroengines [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29: 91-98.

- [14] Schulze M, Chmid M, Sattelmayer T. Influence of Atomization Quality Modulation on Flame Dynamics in a Hypergolic Rocket Engine [J]. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2016, 8(3): 1-16.
- [15] Anderson W E, Ryan H M, Santoro R J, et al. Combustion Instability Mechanisms in Liquid Rocket Engines Using Impinging Jet Injectors[R]. AIAA 95-2357.
- [16] Kim J S, Williams F A. Acoustic-Instability Boundaries in Liquid-Propellant Rockets: Theoretical Explanation of Empirical Correlation [J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(3): 621-624.
- [17] Rayleigh L. The Explanation of Certain Acoustical Phenomena[J]. Nature, 1878, 18: 319-321.
- [18] Conrad T, Bibik A, Lee J, et al. Control of Combustion Instabilities by Fuel Spray Modification Using Smart Fuel Injector[R]. AIAA 2003-4937.
- [19] Conrad T, Bibik A, Shcherbik D, et al. "Slow" Control of Combustion Instabilities by Fuel Spray Modification Using Smart Fuel Injector[R]. AIAA 2004-1034.
- [20] Golovanevsky B, Levy Y. Suppression of Combustion Instability Using an Aerodynamically Exited Atomizer [C]. Citeseer: Proceedings of 11th International Symposium for Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2002.
- [21] Guyot D, Bothien M, Moeck J, et al. Active Control of Combustion Instability Using Fuel Flow Modulation [J]. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 7(1).
- [22] Oefelein J C, Yang V. Comprehensive Review of Liquid-Propellant Combustion Instabilities in F-1 Engine [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(5): 657-677.
- [23] 康忠涛,李向东,毛雄兵,等.液体火箭发动机中气液同轴直流式喷嘴研究综述[J].航空学报,2018,39
   (9).
- [24] Yang A, Li B, Yang S, et al. Periodic Atomization Characteristics of an Impinging Jet Injector Element Modulated by Klystron Effect [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10): 1973-1984.
- [25] Kang Z, Wang Z, Li Q, et al. Review on Pressure Swirl Injector in Liquid Rocket Engine [J]. Acta Astronautica, 2018, 145: 174-198.
- [26] Rayleigh L. On the Instability of Jets [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1878, 10: 4-13.
- [27] Reitz B. Mechanism of Atomization of a Liquid Jet[J]. Physics of Fluids, 1982, 25: 1730-1742.
- [28] Lefebvre A H. Atomization and sprays [M]. New York: Hemisphere Press, 1989.

- [29] Li X, Chen T. Liquid Jet Atomization in a Compressible Gas Streams [J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(3): 369-376.
- [30] Shinjo J, Umemura A. Simulation of Liquid Jet Primary Breakup: Dynamics of Ligament and Droplet Formation
  [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36 (7): 513-532.
- [31] Shinjo J, Umemura A. Detailed Simulation of Primary Atomization Mechanism in Diesel Jet Sprays [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2089-2097.
- [32] De Villiers E, Gosman A D, Weller H G. Large Eddy Simulation of Primary Diesel Spray Atomization [R]. SAE TP, 2004-01-0100.
- [33] Salvafor F J, Romero J V, Rosselló M D. Numerical Simulation of Primary Atomization in Diesel Spray at Low Injection Pressure [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2016, 291: 94-102.
- [34] Grosshans H, Movaghar A, Cao I, et al. Sensitivity of VOF Simulations of the Liquid Jet Breakup to Physical and Numerical Parameters [J]. Computers and Fluids, 2016, 136: 312-323.
- [35] Donnelly R J, Glaberson W. Experiments on the Capillary Instability of a Liquid Jet[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1966, 290(1423): 547-556.
- [36] Goedde E F, Yuen M C. Experiments on Liquid Jet Instability [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 40(8): 495-511.
- [37] Dumouchel C. On the Experimental Investigation on Primary Atomization of Liquid Streams [J]. Experiments in Fluids, 2008, 45(3): 371-422.
- [38] Crane L, Birch S, McCormack P D. The Effect of Mechanical Vibration on the Break-Up of a Cylindrical Water Jet in Air [J]. British Journal of Applied Physics, 1964, 15: 743-751.
- [39] McCormack P D, Crane L, Birch S. An Experimental and Theoretical Analysis of Cylindrical Liquid Jets Subjected to Vibration [J]. British Journal of Applied Physics, 1965, 16: 395-409.
- [40] Chigier N. Breakup of Liquid Sheets and Jets[R]. AIAA 99-3640.
- [41] Miesse C C. The Effect of Ambient Pressure Oscillations on the Disintegration and Dispersion of a Liquid Jet[J]. Jet Propulsion, 1955, 25(3): 525-534.
- [42] Heister S D, Rutz M W, Hilbing J H. Effect of Acoustic Perturbations on Liquid Jet Atomization [J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(1): 82-88.
- [43] Srinivasan V, Salazar A J, Saito K. Modeling the Disin-

tegration of Modulated Liquid Jets Using Volume-of-Fluid (VOF) Methodology[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35: 3710-3730.

- [44] Srinivasan V, Salazar A, Saito K. Numerical Simulation of the Disintegration of Forced Liquid Jet Using Volumeof-Fluid Method [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2010, 24(8): 317-333.
- [45] Yang X, Turan A. Simulation of Liquid Jet Atomization Coupled with Forced Perturbation [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(2).
- [46] Popinet S. Gerris: a Tree-Based Adaptive Solver for the Incompressible Euler Equations in Complex Geometries
   [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 190(2): 572-600.
- [47] Popinet S. An Accurate Adaptive Solver for Surface-Tension Driven Interfacial Flows [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(16): 5838-5886.
- [48] Heidmann M F, Groeneweg J F. Analysis of the Dynamic Response of Liquid Jet Atomization to Acoustic Oscillations[R]. NASA TN D-5339.
- [49] Vorob'Ev A P. Effect of Acoustic Oscillations on the Stability of a Plane Jet[J]. Fluid Dynamics, 1991, 26(4): 736-743.
- [50] Hoover D V, Ryan H M, Pal S, et al. Pressure Oscillation Effects on Jet Breakup [J]. Heat and Mass Transfer in Spray Systems HTD, 1991, 187: 27-36.
- [51] Carpentier J B, Baillot F. Behavior of Cylindrical Liquid Jets Evolving in a Transverse Acoustic Field [J]. Physics of Fluids, 2009, 21(2).
- [52] Ju D, Sun X, Jia X, et al. Experimental Investigation of the Atomization Behavior of Ehanol and Kerosene in Acoustic Fields[J]. Fuel, 2017, 202: 613-619.
- [53] Jia X, Huang Z, Ju D, et al. Effect of High Frequency Acoustic Field on Atomization Behavior of Ethanol and Kerosene[R]. SAE TP, 2017-01-2318.
- [54] Yang L, Jia B, Fu Q, et al. Stability of an Air-Assisted Viscous Liquid Sheet in the Presence of Acoustic Oscillations [J]. European Journal of Mechanics/B Fluids, 2018, 67: 366-376.
- [55] Gonzalez-Flesca M, Schmitt T, Ducruix S, et al. Large Eddy Simulations of a Transcritical Round Jet Submitted to Transverse Acoustic Modulation [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(5).
- [56] Baillot F, Blaisot J, Boisdron G, et al. Behaviour of an Air-Assisted Jet Submitted to a Transverse High-Frequency Acoustic Field [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 640: 304-342.

- [57] Davis D, Chehroudi B. The Effects of Pressure and Acoustic Field on a Cryogenic Coaxial Jet [R]. AIAA 2004-1330.
- [58] Davis D, Chehroudi B. Shear-Coaxial Jets from a Rocket-Like Injector in a Transverse Acoustic Field at High Pressures[R]. AIAA 2006-0758.
- [59] Graham J, Leyva I, Rodriguez J, et al. On the Effect of a Transverse Acoustic Field on a Flush Shear Coaxial Injector[R]. AIAA 2009-5142.
- [60] Hardi J S, Martinez H C G, Oschwald M. LOX Jet Atomization under Transverse Acoustic Oscillations [J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(2): 337-349.
- [61] Hua J, Gunaratne G, Talley D, et al. Dynamic-Mode Decomposition based Analysis of Shear Coaxial Jets with and Without Transverse Acoustic Driving[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 790: 5-32.
- [62] Leyva I, Rodriguez J, Chehroudi B, et al. Preliminary Results on Coaxial Jet Spread Angles and the Effects of Variable Phase Transverse Acoustic Fields [R]. AIAA 2008-950.
- [63] Squire H B. Investigation of the Instability of a Moving Liquid Film [J]. British Journal of Applied Physics, 1953, 4: 167-169.
- [64] Taylor G. Formation of Thin Flat Sheets of Water[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1960, 259: 1–17.
- [65] Dombrowski N, Johns W R. The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets [J]. Chemical Engineering Science, 1963, 18: 203-214.
- [66] Hasson D, Peck R E. Thickness Distribution in a Sheet Formation Formed by Impinging Jets [J]. AICHE Journal, 1964, 10(5): 752-754.
- [67] Dombrowski N, Hooper P C. A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow
   [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 18: 392-400.
- [68] Heidmann M F, Priem R J, Humphrey J C. A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets [R]. NACA TN 3835.
- [69] Heidmann M F, Humphrey J C. Fluctuations in a Spray Formed by Two Impinging Jets[R]. NACA TN 2349.
- [70] Ryan H M, Anderson W E, Pal S, et al. Atomization Characteristics of Impinging Jets [J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11: 135-145.
- [71] Ma D, Chen X. Atomization Patterns and Breakup Characteristics of Liquid Sheets Formed by Two Impinging Jets
   [R]. AIAA 2011-97.
- [72] Chen X, Ma D, Yang V. Mechanism Study of Impact Wave in Impinging Jets Atomization [R]. AIAA 2012-

1089.

- [73] Chen X, Ma D, Yang V. High-Fidelity Numerical Simulations of Impinging Jet Atomization [R]. AIAA 2012–4328.
- [74] Chen X, Yang V. Thickness-based Adaptive Mesh Refinement Methods for Multi-Phase Flow Simulations with Thin Regions [J]. Journal of Computational Physics, 2014, 269: 22-39.
- [75] Anderson W E, Ryan H M, Santoro R J. Impact Wave-Based Model of Impinging Jet Atomization [J]. Atomization and Sprays, 2006, 16: 791-805.
- [76] Bazarov V G, Lee E, Lineberry D, et al. Pulsator Designs for Liquid Rocket Injector Research [R]. AIAA 2007-5156.
- [77] 杨尚荣,杨岸龙,李龙飞,等.喷前压力脉动对撞击式 喷嘴雾化特性的影响[J].推进技术,2017,38(5): 1100-1106. (YANG Shang-rong, YANG An-long, LI Long-fei, et al. Effects of Pressure Pulsation Upstream of Injector on Impinging Injector Atomization[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(5): 1100-1106.)
- [78] Mulmule A S, Tirumkudulu M S, Ananthkrishnan N, et al. Liquid Sheet Instability in the Presence of Acoustic Forcing[R]. AIAA 2007-5688.
- [79] Mulmule A S, Tirumkudulu M S, Ramamurthi K. Instability of a Moving Liquid Sheet in the Presence of Acoustic Forcing[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(2).
- [80] Dighe S, Gadgil H. Dynamics of Liquid Sheet Breakup in the Presence of Acoustic Excitation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 99: 347-362.
- [81] Zhang P, Wang B. Effects of Elevated Ambient Pressure on the Disintegration of Impinged Sheets [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(4).
- [82] Santoro R J, Anderson W E. Combustion Instability Phenomena of Importance to Liquid Propellant Engines [R]. The Pennsylvania University Technical Report No. 93-0667.
- [83] Bazarov V G. Liquid Injector Dynamics [M]. Moscow: Mashinostroenie, 1979.
- [84] Bazarov V G. Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 797-806.
- [85] Bazarov V G. Design of Injectors for Self-Sustaining of Combustion Chambers Stability[R]. AIAA 2006-4722.
- [86] Fu Q, Yang L, Qu 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.
- [87] Yang A, Yang S, Xu Y, et al. Periodic Atomization

Characteristics of Simplex Swirl Injector Induced by Klystron Effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31 (5): 1066-1074.

- [88] Cheng P, Li Q, Kang Z, et al. Response of Inner Flow and Spray Characteristics of a Pressure Swirl Injector to Pressure Oscillation Supply System [J]. Acta Astronautica, 2019, 154: 82-91.
- [89] 康忠涛,王振国,李清廉,等.压力振荡对气液同轴离 心式喷嘴自激振荡的影响[J]. 航空学报, 2018, 39(6).
- [90] 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.
- [91] Khil T, Kim S, Kim H, et al. Spray Characteristics of a

Single Simplex Injector with Low Hydrodynamic Disturbance Generated by Pressure Fluctuation in Feed Line [C]. Kyoto: International Conference on Liquid Atomization and Spray System, 2006.

- [92] Chung Y, Kim H, Jeong S, et al. Dynamic Characteristics of Open-Type Swirl Injector with Varying Geometry
  [J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(3): 583-591.
- [93] 薛帅杰,刘红军,洪 流,等.厚液膜敞口型离心喷 嘴动力学特性试验研究[J].航空学报,2018,39 (12).
- [94] 杨岸龙,杨尚荣,费 俊,等.一种高频高幅值反压 振荡雾化实验装置[P].中国专利:201610858912.1, 2017-03-29.

(编辑:朱立影)