

# 气液同轴敞口型离心喷嘴的自激振荡特性实验

马杰, 王勇, 刘占一, 杨尚荣, 周立新

(西安航天动力研究所液体火箭发动机技术重点实验室, 西安, 710100)

**摘要** 为了研究气液同轴敞口型离心喷嘴的自激振荡特性,采用阴影法和动态测量系统开展了常温大气环境中的喷嘴雾化试验。喷嘴自激振荡时,出口附近存在明显的周期性雾化过程,上游瞬态压力形成周期性脉动,压力脉动、噪音和雾场图像频率高度一致,范围约为1 583~5 634 Hz。通过试验分析了喷嘴流量特性规律,在雾场稳定时和自激振荡时气相与液相互阻塞均会造成喷前压力升高,液相流量对气相喷前压力影响较大。喷嘴自激振荡频率随气相和液相流量增长,相对液相流量较为敏感,液相流量增至一定临界值,自激振荡消失,而气相流量增长始终伴随自激振荡频率缓慢提高。喷嘴存在自激振荡产生的上下液相边界条件,自激振荡范围随着气相流量增大而变宽,气相对自激振荡起促进作用,而液相阻碍了自激振荡发展。增加内喷嘴壁面厚度时,液膜厚度增加,无量纲气核尺寸减小,自激振荡频率增大。

**关键词** 气液同轴敞口型离心喷嘴;雾化试验;自激振荡;喷前压力;噪音频率;边界条件

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.05.001

**中图分类号** V434.13 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)05-0001-08

## An Experimental Investigation on Self-Pulsation Characteristics of Gas/Liquid Open-End Swirl Coaxial Injector

MA Jie, WANG Yong, LIU Zhanyi, YANG Shangrong, ZHOU Lixin

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract** In order to understand the self-pulsation characteristics of the gas/liquid open-end swirl coaxial injector, the atomization test in the atmospheric environment is carried out by adopting the shadow method and the dynamic measurement system. The exit of injector nearby presents a periodic spray process significantly with upstream transient pressure responding repeatedly, while self-pulsation happens. Moreover, the frequency of former pressure, acoustic pressure and spray graphics are highly consistent, ranging from 1 583 Hz to 5 634 Hz. Through analyzing flow rate discipline, it's concluded that the injection pressure always presents increasing due to the interaction of gas phase and liquid phase, whether the atomization field displays stable or self-pulsation. As well, liquid flow has stronger influence on the injection pressure than gas flow. The results show that self-pulsation frequency increases with gas phase and liquid phase mass flow, and is relatively sensitive to liquid phase mass flow. As the liquid mass flow growing to critical level, the self-pulsation disappears. Then the self-pulsation frequency keeps improving slowly with gas mass

**收稿日期:** 2021-05-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(51606138)

**作者简介:** 马杰(1972—),女,黑龙江北安人,高级工程师,研究方向:液体火箭发动机技术。E-mail:hjtj@cascl1.com

**通信作者:** 周立新(1966—),男,重庆人,研究员,博士生导师,研究方向:液体火箭发动机技术。E-mail:zhoulx@cascl1.com

**引用格式:** 马杰,王勇,刘占一,等.气液同轴敞口型离心喷嘴的自激振荡特性实验[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(5):1-8. MA Jie, WANG Yong, LIU Zhanyi, et al. Experimental Investigation on Self-Pulsation Characteristics of Gas/Liquid Open-End Swirl Coaxial Injector[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(5): 1-8.

flow increasing. The open-end swirl coaxial injector has the upper and lower liquid phase boundary condition generated self-pulsation, and the range widens as gas phase increases. So the gas phase promotes self-pulsation, however liquid phase hampers the development of the self-pulsation. When the liquid swirl injector's wall is thickened, the liquid film thickness increases and the dimensionless gas core shrinks. Furthermore, the self-pulsation frequency of the new coaxial injector is larger than that of the original one.

**Key words** gas/liquid open-end swirl coaxial injector; atomization test; self-pulsation; injection pressure; acoustic frequency; boundary condition

气液同轴离心式喷嘴具有雾化效果好、掺混均匀性高和燃烧稳定等优点,主要应用于航空航天推进动力系统中<sup>[1]</sup>,国内外开展了大量的试验与仿真研究<sup>[2-4]</sup>。在液相中心式气液同轴离心喷嘴工作过程中,气相与液相之间相互剪切作用的时滞反馈可能会引起压力和流量振荡,产生自激振荡现象<sup>[5]</sup>。喷嘴的自激振荡将影响推进剂雾化燃烧过程,进而可能诱发高频不稳定燃烧现象。

在气液同轴喷嘴自激振荡生成机理研究方面,Bazarov<sup>[6-7]</sup>提出了分析自激振荡分布的线性理论模型,计算的自激振荡分布区域与试验结果一致。Huang等<sup>[8-9]</sup>建立了喷嘴共振声学模型,认为自激振荡产生机理是喷嘴环形通道中气流的固有频率与液体喷嘴气流的固有频率耦合产生共振。Kim等<sup>[10]</sup>认为自激振荡是由射流上的 Kelvin-Helmholtz 不稳定造成的。Im等<sup>[11]</sup>认为喷嘴自激振荡取决于液膜上的占优表面波。Chad等<sup>[12]</sup>通过对无缩进中心液相的气液同轴离心喷嘴出口附近的纹影图像分析,认为液膜表面的 K-H 不稳定可能是引起自激振荡的直接原因,发动机在工作时如果喷嘴自激振荡与燃烧室声学特征耦合则会产生燃烧不稳定性<sup>[13]</sup>。

针对同轴离心喷嘴自激振荡特性,Sasaki等<sup>[14]</sup>研究了喷嘴缩进长度对雾化特性影响,在带有缩进的喷嘴中可能会出现自激振荡现象。Im等<sup>[15-16]</sup>研究了结构参数和工作参数对气液同轴离心喷嘴自激振荡的影响,气相动量和缩进激励自激振荡生成,而液相动量和喷嘴间隙则抑制振荡;在背压条件下,高压环境会显著影响液膜占优表面波,进而抑制自激振荡<sup>[17]</sup>,而液相动量对自激振荡影响变小<sup>[18]</sup>。康忠涛等<sup>[19]</sup>分析了大的气核尺寸对气液同轴离心式喷嘴自激振荡喷雾形态的影响,认为气核尺寸对自激振荡的产生机理有显著影响,同时研究了喷前压力扰动对喷嘴自激振荡特性的耦合规律<sup>[20-21]</sup>。Chad等<sup>[22]</sup>研究了同轴离心喷嘴自激振荡的工作条件,认为液体剥离过程在自激振荡机理中起到重要作用,缩进使喷嘴液相表面更容易形成强烈周期性表面波,在喷嘴出口容易剥离,激发流量和压力的

振荡。

针对同轴剪切喷嘴自激振荡特性,Yoshio等<sup>[23-24]</sup>研究了气液同轴剪切喷嘴的自激振荡特性,自激振荡时,喷嘴流动产生“堵塞”。Yoon等<sup>[25-26]</sup>研究了喷注参数和缩进对同轴剪切喷嘴自激振荡特性影响,自激振荡时,雾化角较大增大,自激振荡频率和雷诺数呈正比,和缩进长度呈反比。Chung等<sup>[27]</sup>发现了气液同轴剪切喷嘴的3种不稳定雾化模式,每种模式的雾场结构不同,获得了雾化不稳定的转化图。关于同轴剪切喷嘴燃烧不稳定性,丁兆波等<sup>[28]</sup>研究了氢、氧同轴直流式喷嘴结构参数对燃烧特性的影响,提高氧喷嘴出口壁厚能够显著改善燃烧稳定性。田原等<sup>[29]</sup>研究了同轴剪切喷嘴高频喷注耦合燃烧不稳定性,分析了结构参数和工作参数对氧喷嘴声学频率的影响。

根据目前研究成果,同轴喷嘴自激振荡特性研究工作主要围绕冷态模拟试验,集中于自激振荡影响因素和自激振荡机理分析。喷嘴结构主要围绕中心液的同轴收口型离心式喷嘴和中心气的同轴剪切喷嘴,研究以缩尺件、小流量工况为主,而关于同轴敞口型离心式喷嘴自激振荡特性和边界条件尚未开展研究。本文针对液氧/气氢同轴敞口型离心喷嘴开展自激振荡特性研究,明晰喷嘴自激振荡生成过程,获得自激振荡影响变化规律及大范围变工况的稳定性工作边界。

## 1 实验方法

### 1.1 喷嘴介绍

实验采用大流量液氧/气氢同轴离心式喷嘴,喷嘴结构如图1所示,内喷嘴为敞口型离心式喷嘴,由8个直径为1.5 mm的切向孔沿周向呈45°分两排布置,液体通过切向孔实现旋流运动。内喷嘴出口直径为7.0 mm,外侧直径为8.0 mm。气体喷嘴为离心式喷嘴外围的轴向环缝,气体由12个直径为1.5 mm径向孔进入喷前集气腔,喷嘴出口直径为9.1 mm,缩进长度6.6 mm。

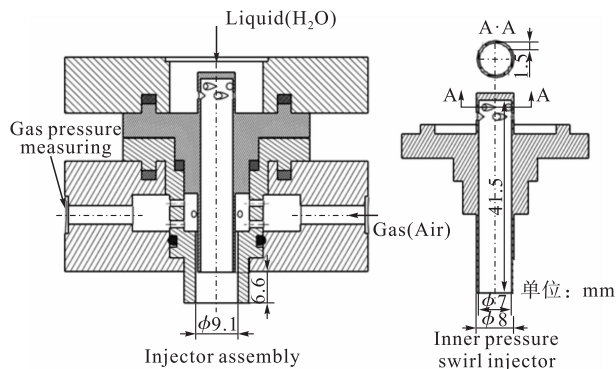


图 1 喷嘴结构

以空气和水作为介质模拟气液同轴喷嘴工作特性时,为反映真实介质氢气和液氧工作性能,分别通过调整喷嘴流量和压降使得模拟介质与真实氢、氧介质喷注的动量比、雷诺数和韦伯数等无量纲相似参数相同。

$$Re = \frac{\rho_l V_l d_0}{\mu_l} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_g (V_g - V_l)^2 d_0}{\sigma_l} \quad (2)$$

表 1 列出了液氧/气氢同轴敞口型离心喷嘴大范围变比调节的模拟试验工况,水流量 0.07~0.7 kg/s、空气流量 0.002~0.03 kg/s,雷诺数、韦伯数通过上述公式确定。

表 1 模拟试验工况

参数	液相	气相
质量流量/(kg/s)	0.07~0.7	0.002~0.03
压力/MPa	0.056~2.33	0.062~0.88
速度/(m/s)	4.26~68.47	118.0~347.2
Re	13 597.6~132 223.3	
We	31.6~8 574.7	
动量比	0.03~5.41	
Re/We	10.62~602.7	

### 1.2 实验系统

实验系统包括气、液路供应系统,高速摄像系统,动态压力和声学测量系统。气、液路供应系统给气液同轴离心式喷嘴提供试验用水和空气,在管路系统中分别设置流量调节阀和科氏力质量流量计,用以实现空气和水流量的控制和测量。实验装置集气腔和集液腔分别布置喷前缓变压力测点,在空气和水入口上游 10 cm 附近管路处设置动态压力测量接口。高速摄像系统由 LED 强光灯和 Phantom V640 高速 CCD 相机组成,采集喷嘴下游雾场变化阴影图像。动态压力和声学测量系统由动态压力传感器、声学传感器、OROS 采集系统和计算机等组成。采用 Kistler 6052C 型动态压力传感器对喷嘴喷前压力振荡数据进行采集,采样率

51.2 kHz。4947 型声学传感器对喷嘴自激振荡时的“啸叫”声压进行采集,灵敏度 11.6 mV/Pa,采样率 51.2 kHz。

### 1.3 图像处理方法

实验喷嘴下游雾场测量采用高速摄像系统,图像分辨率为 512×600,覆盖喷嘴出口下游高度 80 mm 区域,帧频为 13 002 Hz,曝光时间 20 μs。通过高速摄像捕获得到气液同轴敞口离心喷嘴自激振荡时典型雾场形态如图 2 所示。处理高速摄像捕获的雾场图像时,在 1.07 s 时间内高速摄像采集的 13 909 张图上选择大小相同的固定区域,计算出平均灰度值,按时间顺序对图像集进行灰度 FFT 分析,得到喷嘴下游雾场频域特性,如图 3 所示。

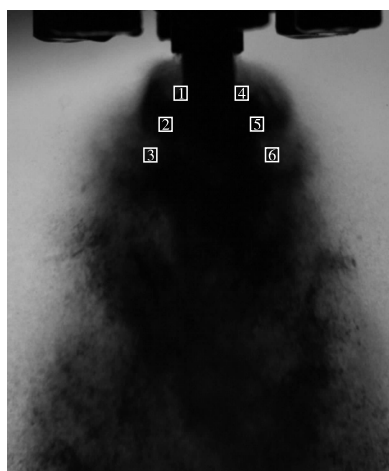


图 2 离心喷嘴自激振荡时典型雾场形态

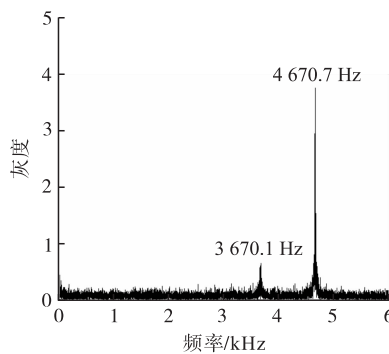


图 3 喷嘴下游雾场频域特性

频谱结果的灰度幅值表征图像的明暗程度,其结果可以定性表示雾场稠密的程度,因气液同轴离心喷嘴的实验工况范围较大,存在雾场比较浓密的情形,灰度有可能都达到下限零值。在图 2 中雾场边区选择 6 个不同灰度统计位置区域进行 FFT 分析,如图 4 所示,不同取样区域处理得到的雾场自激振荡频率均为 4 670.7 Hz。同时,在喷嘴自激振荡稳定性判断时,通过雾场图像、动态压力和声压 3 种数据频域特性综合判定是否产生自激振荡。

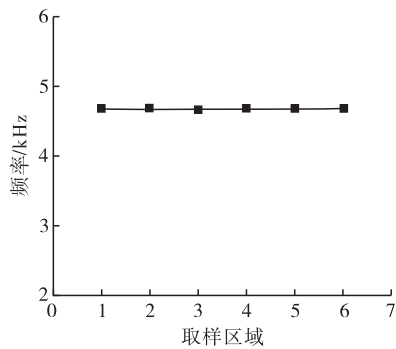


图4 不同采样区域自激振荡频率

## 2 实验结果与分析

### 2.1 自激振荡过程描述

图5是气液同轴离心喷嘴未加空气时,即敞口离心式内喷嘴单独工作,不同水流量条件下的雾场图像。在水流量较小时,喷嘴未见雾化,呈现液膜状态,此时的雾化角度为 $45^\circ$ 。随着水流量的增加,喷嘴出口液膜的表面波逐步减小、周期增大,液膜在波峰与波谷处断裂形成液丝,进而在空气环境气动力

作用下发展为液滴,雾场以液膜和稠密大颗粒液滴为主。在水流量自 $300\text{ g/s}$ 逐步增加时,离心式喷嘴液膜充分发展,离心式喷嘴产生的锥形液膜在缩进室内部撞击环缝壁面,雾化角度维持在约 $54^\circ$ ,与收口式同轴双旋流内喷嘴单独工作时雾化锥角随喷射压力变化结果一致<sup>[30]</sup>。

图6是同轴离心喷嘴空气流量 $14.7\text{ g/s}$ 、水流量 $402.8\text{ g/s}$ 工况时,喷嘴下游不同时刻的雾场变化图像,雾场呈现出“钟型”结构。从雾场转化图中可以看出,在 $0\text{ ms}$ 时,喷嘴出口处雾场保持圆柱形,两侧为向上卷吸的多层雾团; $0.0769\text{ ms}$ 时,雾团向下移动发展,同时圆柱形雾场形成径向凸起,逐步堆积增大;至 $0.1538\text{ ms}$ 时,凸起发展为雾团,此时液相对气相的阻塞继续加强,气相喷射压力增大; $0.2307\text{ ms}$ 时,气相克服液相的阻塞而释放,在气动力作用下吹除雾团整体向下移动,并向上卷吸,恢复至与 $0\text{ ms}$ 相似的雾场,完成一个周期自激振荡过程。此时雾场变化频率约为 $4\,334.6\text{ Hz}$ ,与雾场频谱分析得到的 $4\,670.7\text{ Hz}$ 接近。

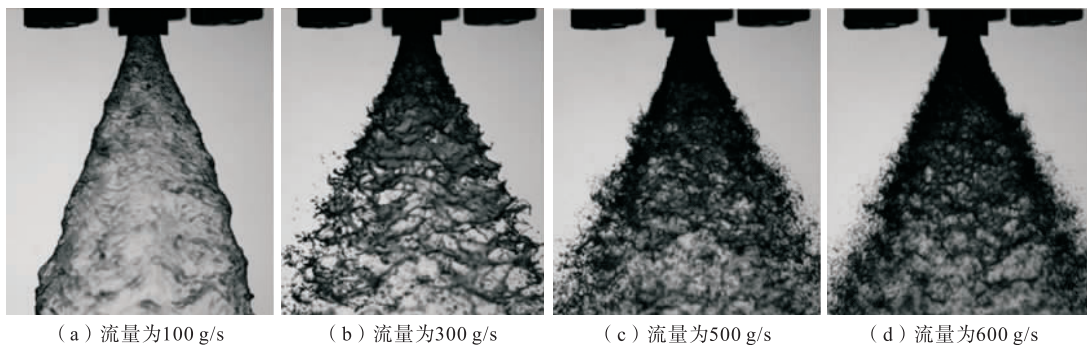


图5 不同水流量条件下的雾场图像

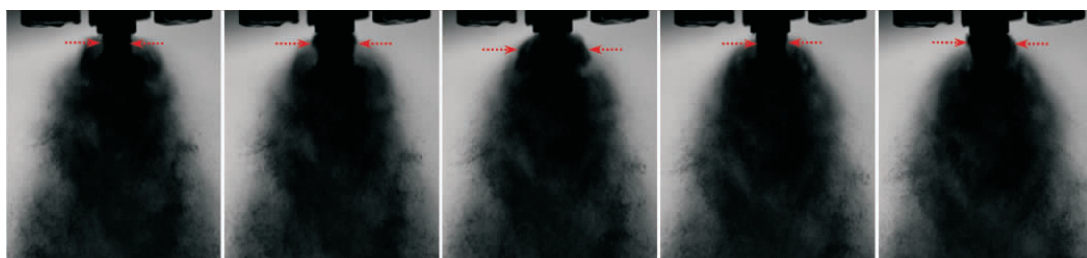
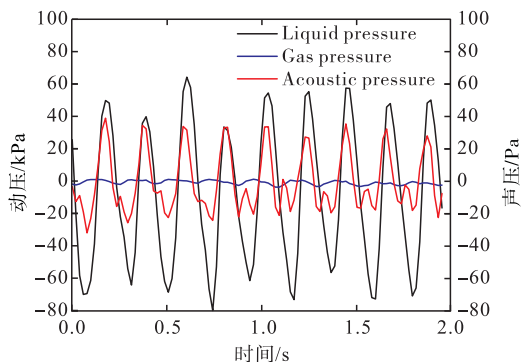


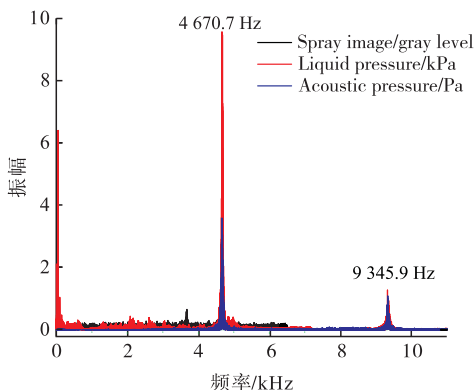
图6 喷嘴下游不同时刻的雾场变化图像

气液同轴敞口型离心喷嘴产生自激振荡现象时,喷嘴上游气相和液相瞬态压力均形成周期性脉动,且喷嘴发出“啸叫”声。图6典型工况自激振荡时对应的动态系统测量结果如图7所示,包括喷嘴上游压力脉动、噪音脉动和雾场图像的时域和频谱分析结果,三者频率高度一致,其中液相动态压力和声压相位基本同步,而气相动态压力相位超前或滞

后于前者。此时中心敞口型离心喷嘴上游平均绝压为 $1.0\text{ MPa}$ ,压力脉动振幅约为总压的 $\pm 6.2\%$ ;而外侧气喷嘴由于气体可压缩性和能量耗散,致使脉动压力幅值较小,仅为总压的 $\pm 1.5\%$ 左右。喷嘴产生自激振荡时,振荡特性向上游管路传播时,对液体供应管路的影响相对高于气体管路。



(a) 喷嘴器上游瞬态压力和声压

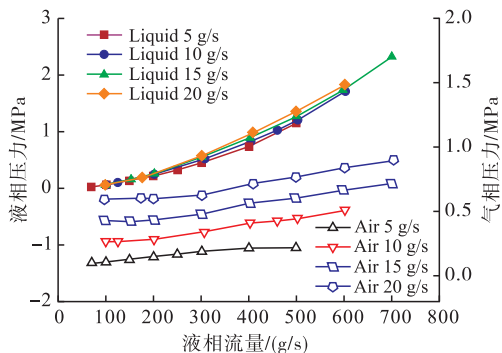


(b) 瞬态压力和喷射模式的频率

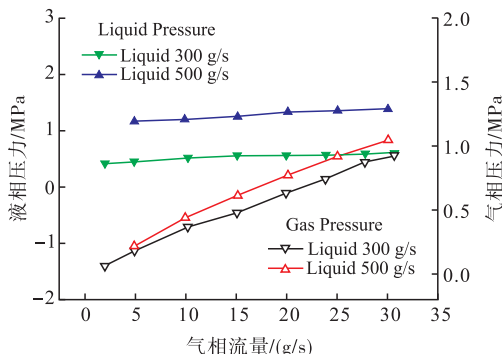
图 7 自激振荡时对应的动态系统测量结果

2.2 喷嘴流量特性

文献[19]认为气液同轴喷嘴在自激振荡发生时,喷嘴内部流动从非堵塞变为堵塞。因此,针对同轴敞口型离心喷嘴的喷前缓变压力和质量流量测量结果进行分析。图 8 是气液同轴敞口型离心喷嘴大范围变工况时的流量特性曲线,涵盖表 1 中同轴喷嘴所有试验工况,雾场存在自激振荡现象和稳定两种工作模式。图 8(a)表示固定气相流量、改变液相流量时的流量特性曲线,图 8(b)表示固定液相流量、改变气相流量时的流量特性曲线。在气相流量不变时,随着液相流量的增大,液相压力呈指数增长,气相喷前压力随之增大;在液相流量不变时,随着气相流量增大,液相喷前压力也增大。通过对比可以看出,液相流量变化引起的气相压力增长率相对大于气相流量变化时的液相压力增长率。因此,气液同轴离心喷嘴工作时,始终存在由于气、液相相互作用引起的喷前压力变化,与是否自激振荡发生时所引起的喷嘴“堵塞”[19]无明显关系。同时,由于喷嘴气、液之间的相互作用关系复杂,难以获取较为准确的混合点压力参数和敞口离心式喷嘴实际性能参数,且喷嘴堵塞造成了气体与液膜速度计算的不确定性,因此使用气相和液相质量流量作为喷嘴自激振荡发生条件来衡量。



(a) 固定气相流量、改变液相流量时的流量特性曲线

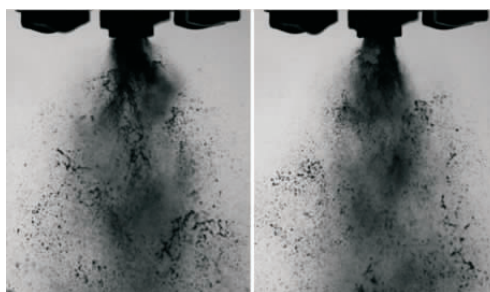


(b) 固定液相流量、改变气相流量时的流量特性曲线

图 8 大范围变工况时的流量特性曲线

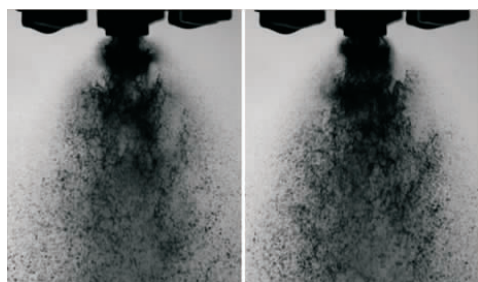
2.3 气液比对自激振荡特性的影响

图 9 是固定气相流量 5 g/s 时,逐渐增大液相流量对应的喷嘴下游雾场图像。通过时域图像频谱分析可知,随着液相流量的增加,雾场从稳态转为自激振荡状态,进一步增加液相流量后,自激振荡现象消失。在液相流量较小时,液相介质通过敞口型离心内喷嘴以液膜形式旋流至气相喷嘴环缝出口处,阻塞气体流动;在气体作用下,液膜直接破碎形成雾场,雾场存在较大颗粒液滴,同时气相由于阻塞作用造成喷前压力升高,最终喷嘴稳定在某一平衡状态工作。随着液相流量增大,液膜速度和动量的提高使气相通道堵塞,气相喷前压力持续提高,最终克服液膜的阻塞作用而形成第 2.1 节不稳定的自激振荡现象,此时雾化效果最佳,且呈现明显“圣诞树”型分布[26]。液相流量进一步增大后,气相喷前压力的提高不足以克服液相的堵塞作用而稳定在某一平衡状态,此时雾场呈现“锥形”结构,与液相离心式喷嘴单独工作时雾化角接近,但雾化效果较好。

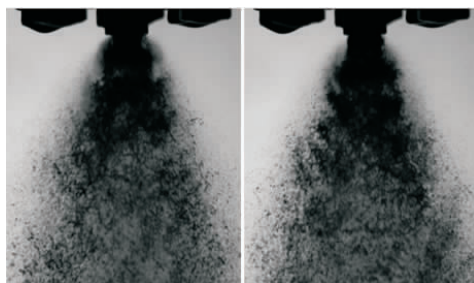


(a) 70 g/s, stable

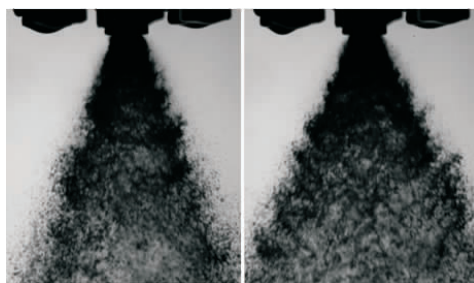
(b) 100 g/s, stable



(c) 149.8 g/s, 1995.3Hz (d) 199.8 g/s, 2399.6 Hz



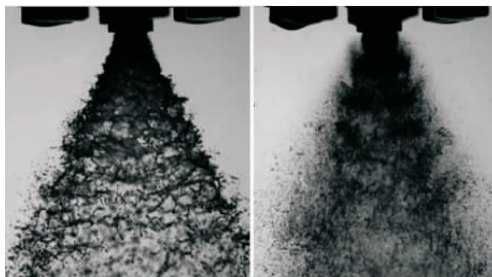
(e) 250.6 g/s, 2876.1 Hz (f) 301.1 g/s, 3250.0 Hz



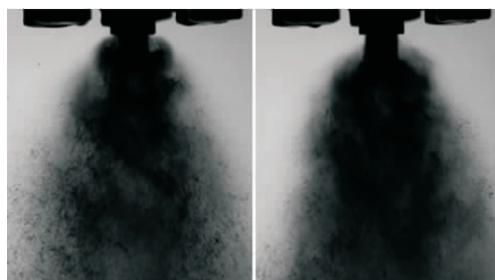
(g) 400.6 g/s, stable (h) 500 g/s, stable

图9 固定气相流量 5 g/s 时,逐渐增大液相流量对应的喷嘴下游雾场图像

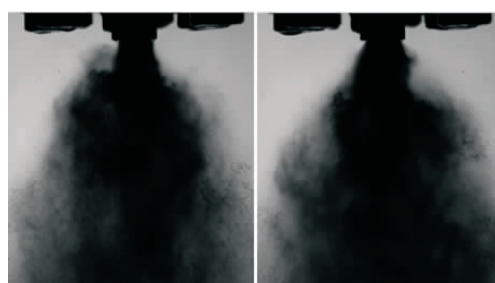
图 10 是固定液相流量 300 g/s 时,逐渐增大气相流量对应的喷嘴下游雾场图像。通过时域图像频谱分析可知,产生喷嘴自激振荡现象时,雾场同样呈现明显“圣诞树”型分布,但随着气相流量进一步增加,雾场呈现“钟型”结构特征,边区雾场均向上卷吸,气相流量达到 20 g/s 以上时,喷嘴始终存在大于 4 kHz 频率特性。在气相流量较小时,液相介质几乎完全阻塞气体流动,气体不足以扰动液相雾场;随着气相流量增大,气体喷嘴出口速度和动量增大,能够克服液膜的壅塞,进而形成不稳定的自激振荡现象;气相流量持续增长时,气体始终能够克服液膜的壅塞作用,保持自激振荡现象,由于液相流量恒定,因此雾场未见明显变化。



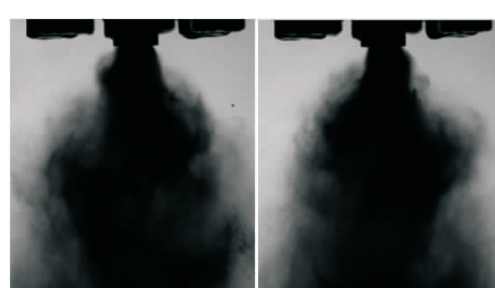
(a) 2 g/s, stable (b) 5.2 g/s, 3198.0 Hz



(c) 10 g/s, 3798.6 Hz (d) 15 g/s, 3954.6 Hz



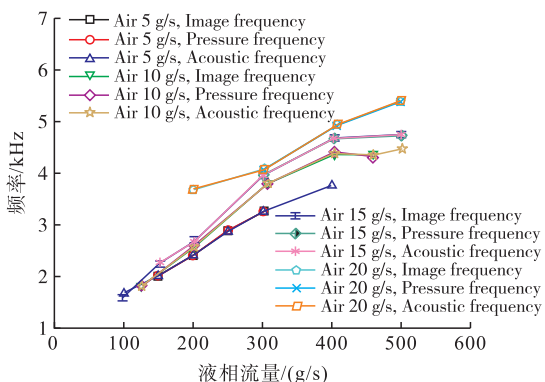
(e) 20 g/s, 4058.5 Hz (f) 24 g/s, 4152.4 Hz



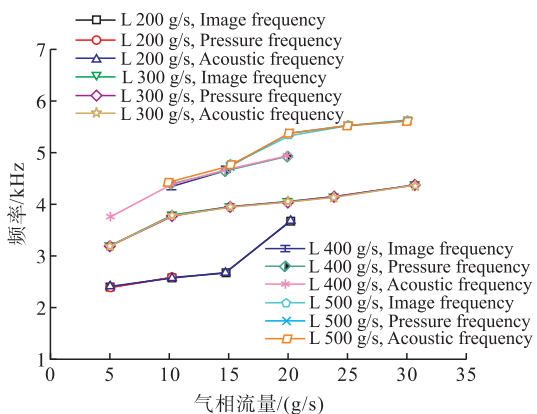
(g) 28 g/s, 4285.2 Hz (h) 30 g/s, 4380 Hz

图10 固定液相流量 300 g/s 时,逐渐增大气相流量对应的喷嘴下游雾场图像

图 11 是气液同轴敞口型离心喷嘴产生自激振荡时,通过图像处理和脉动压力频谱分析得到的自激振荡频率随液相和气相质量流量的变化规律,压力脉动、噪音脉动和雾场图像的频谱分析结果始终保持一致。喷嘴产生自激振荡现象时,频率范围约为 1 583~5 634 Hz。当气相质量流量恒定时,随着气液比的减小,喷嘴自激振荡频率呈线性增长,主要是液相流量增大促使阻塞气相喷嘴的时间缩短;随着气相流量的增加,自激振荡频率增长率逐步增大,主要是气相动量增大加快了液相雾场阻塞吹除释放;气液比减小至某一临界值后,喷嘴自激振荡频率继续增长,但增长率降低;气液比进一步减小后,自激振荡现象消失。当液相质量流量恒定时,随着气液比的增大,喷嘴自激振荡频率迅速增大;超过某一临界值后,频率一直呈线性增长。可以看出,喷嘴自激振荡频率变化对液相流量更为敏感,自激振荡特性主要取决于液相喷嘴工作状态。



(a) 液相质量流量变化



(b) 气相质量流量变化

图 11 自激振荡频率随液相和气相质量流量的变化规律

2.4 离心喷嘴壁厚对自激振荡特性影响

气液同轴离心喷嘴在雾化燃烧过程中,气相和液相介质在喷嘴缩进室开始进行掺混燃烧,中心位置的敞口型离心式喷嘴出口壁面厚度对于气、液两相的雾化掺混以及燃烧火焰的稳定具有重要作用。壁面厚度较小时,内喷嘴唇口易出现烧蚀;壁面厚度过大时,则影响气、液两相掺混燃烧效果。图 1 气液同轴敞口型离心喷嘴的内喷嘴出口壁面 0.5 mm,保持内喷嘴出口外径和外喷嘴结构尺寸、缩进尺寸恒定的情况下,调整内喷嘴出口壁厚至 1.0 mm。调整结构尺寸后的同轴喷嘴 2 自激振荡频率与原喷嘴 1 自激振荡频率对比结果如表 2 所示,振荡频率提高了 1 kHz 以上。

表 2 自激振荡频率对比结果

液相流量/ (g/s)	气相流量/ (g/s)	喷嘴 2 频率/ Hz	喷嘴 1 频率/ Hz
150	5.0	2 972	1 987.0
380	15.0	5 359	4 529.2
250	15.0	4 875	3 346.1
350	14.3	5 342	4 293.2

根据 Kim 等<sup>[19]</sup>提出的液膜计算公式,原喷嘴 1 在额定液相流量 400 g/s 时,液膜厚度 964.7 $\mu$ m,气核尺寸无量纲数 2.62,比文献中大 3 倍;而喷嘴 2

同样工况条件下,液膜厚度 1 018.2  $\mu$ m,无量纲数 1.94。结果表明,内喷嘴壁面厚度增加时,液膜厚度增加,但无量纲气核尺寸减小;液喷嘴出口速度增大,导致液相动量增加,因此喷嘴自激振荡频率增大。

2.5 自激振荡的稳定性边界

气液同轴敞口型离心喷嘴大范围变工况时,工作参数范围如表 1 所示,喷嘴的工作特性分为自激振荡状态和非自激振荡状态,即稳定状态,实验统计结果如图 12 所示。喷嘴工作特性随液相变化存在产生自激振荡的上下两个边界条件,上边界与文献 [1] 中类似,液相流量较小时,离心式喷嘴形成的液膜不足与气相产生相互作用,而过大的液相流量对气相产生“阻塞”;随着气相流量增长,自激振荡产生的范围越宽;气相对自激振荡起促进作用,而液相阻碍了自激振荡的发展。

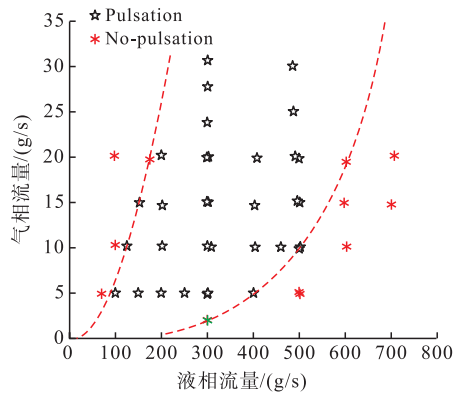


图 12 实验统计结果

3 结论

①喷嘴产生自激振荡时,喷嘴出口经过圆柱形雾场,圆柱形雾场形成径向凸起,凸起发展为雾团,雾团向上卷吸,整体向下移动,完成一个周期自激振荡过程。②喷嘴自激振荡时,上游瞬态压力形成周期性脉动,喷嘴发出“啸叫”声,压力脉动、噪音和雾场图像频率始终保持一致,频率范围约为 1 583 Hz~5 634 Hz,液相压力脉动振幅相对气相压力较高,液相压力与声压相位同步。③气液同轴喷嘴在工作过程中,气相与液相相互阻塞,造成喷前压力升高,与是否产生自激振荡形成喷嘴“壅塞”无关,且液相流量对气相喷前压力影响较大。④喷嘴自激振荡频率随气相和液相流量增长,液相流量增大时自激振荡消失,而气相流量超过某一临界值后,雾场状态基本保持不变,但自激振荡频率继续增长。⑤内喷嘴壁面厚度增加时,液膜厚度增加,无量纲气核尺寸减小,自激振荡频率增大。⑥喷嘴存在产生自激振荡

的上下两个液相边界条件,随着气相流量增长,自激振荡范围越宽;气相对自激振荡起促进作用,而液相阻碍了自激振荡的发展。

### 参考文献

- [1] 杨立军,富庆飞,王永涛,等.液体火箭发动机喷嘴动力学研究进展[J].火箭推进,2006,32(6):35-42.
- [2] 吴迪,金峰,刘勇.煤油/氧气同轴离心喷嘴燃烧数值模拟[J].火箭推进,2021,47(2):32-39.
- [3] 杨尚荣,周晨初,王牧昕.同轴离心式喷嘴热声不稳定性递归网络分析[J].火箭推进,2021,47(1):36-42.
- [4] 王栋,梁国柱.  $N_2O/C_3H_8$  火炬式点火器工作性能数值模拟研究[J].火箭推进,2016,42(2):13-18.
- [5] IM J H, KIM D, YOON Y, et al. Self-Pulsation Characteristics of a Swirl Coaxial Injector with Various Injection and Geometric Conditions [Z]. AIAA 2005-3749.
- [6] BAZAROV V. Self-Pulsation in Coaxial Injectors with Central Swirl Liquid Stage[Z]. AIAA 1995-2358.
- [7] BAZAROV V, YANG V. Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 797-806.
- [8] HUANG Y, ZHOU J, HU X, et al. Acoustic Model for the Self-Oscillation of Coaxial Swirl Injector[Z]. AIAA 1997-3328.
- [9] 黄玉辉,周进,胡小平,等.气液同轴式喷嘴自激振荡的试验现象和声学模型及对火箭发动机不稳定燃烧的影响[J].声学学报,1998,23(5):459-465.
- [10] KIM B D, HEISTER S D. Effect of Chamber Pressure Variation on High-Frequency Hydrodynamic Instability of Shear Coaxial Injector[Z]. AIAA 2004-3522.
- [11] IM J H, KIM D, HAN P, et al. Self-Pulsation Characteristics of a Gas-Liquid Swirl Coaxial Injector[J]. Atomization and Spray, 2009, 19(1): 57-74.
- [12] CHAD J E, DAVID M L, ROBERT A F J. Detailing the Stability Boundary of Self-Pulsations for a Swirl-Coaxial Injector Element[Z]. AIAA 2013-4064.
- [13] CHAD J E, DAVID M L, ROBERT A F J. Propellant Throttling Effects on Self-Pulsation of Liquid Rocket Swirl-Coaxial Injection[Z]. AIAA 2012-4204.
- [14] SASAKI M, SAKAMOTO H, TAKAHASHI M, et al. Comparative Study of Recessed and Non-Recessed Swirl Coaxial Injectors[Z]. AIAA 1997-2907.
- [15] IM J H, KIM M K, YOON Y. Self-Pulsation Characteristics of a Swirl Coaxial Injector [J]. ICLASS 2006-092.
- [16] IM J H, SEONGHO C, YOUNGBIN Y, et al. Comparative Study of Spray Characteristics of Gas-Centered and Liquid-Centered Swirl Coaxial Injectors [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(6): 1196-1204.
- [17] IM J H, KIM D, HAN P, et al. The Effects of the Ambient Pressure on Self-Pulsation Characteristics of a Gas/Liquid Swirl Coaxial Injector [Z]. AIAA 2008-4850.
- [18] IM J H, YOON Y, BAZAROV V G. Experiment Study on Self-Pulsation of a Gas/Liquid Swirl Coaxial Injector in High Pressure Environment[Z]. IAC-2009, C4.8.9.
- [19] 康忠涛,张新桥,成鹏,等.气核尺寸对气液同轴离心式喷嘴自激振荡的影响[J].航空学报,2014,35(12):3283-3292.
- [20] 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):121988.
- [21] 盛立勇,李清廉,白晓,等.液液同轴离心式喷嘴喷雾过程研究进展[J].火箭推进,2020,46(3):1-10.
- [22] CHAD J E, ROBERT A F J. Details on the Mechanism of High-Frequency Swirl Coaxial Self-Pulsation [J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(6): 1418-1427.
- [23] YOSHIO N, HIROSHI S, HIROSHI T, et al. An Experimental Study of Super-Pulsating Flow on a Shear Coaxial Injector with a Recessed Inner Post[Z]. AIAA 2007-5560.
- [24] YOSHIO N, HIROSHI T, TAKUO O, et al. Effect of Liquid Disintegration on Flow Instability in a Recessed Region of a Shear Coaxial Injector[Z]. AIAA 2009-5389.
- [25] YOON J, CHUNG J M, YOON Y. Study on Self-Pulsation Characteristics of Gas Centered Shear Coaxial Injector for Supercavitating Underwater Propulsion System[J]. Inter J Nav Archit Oc Engng, 2011(3): 286-292.
- [26] YOON J, CHUNG J M. Study on Self-Pulsation Characteristics of Gas/Liquid Shear Coaxial Injector with Annular Liquid Sheets[Z]. AIAA 2012-3859.
- [27] CHUNG J M, YOON J, YOON Y. Effect of Recess Length on Instability in a Gas-Centered Liquid Annular Jet[J]. Atomization and Spray, 2015, 25(1): 1-21.
- [28] 丁兆波,陶瑞峰,许晓勇.气氢/液氧同轴喷注单元细节对燃烧特性的影响[J].火箭推进,2013,39(5):31-34.
- [29] 田原,李丹琳,孙纪国,等.同轴剪切喷嘴高频喷注耦合燃烧不稳定分析[J].火箭推进,2014,40(3):23-28.
- [30] 王尧,李国岫,虞育松,等.喷射压力对同轴旋转射流喷雾锥角影响的实验研究[J].推进技术,2017,38(4):903-908.

(编辑:姚树峰)