文氏管非定常空化流动可视化实验研究

刘上^{1*}, 陈炜¹, 张兴军², 赵瑞国¹, 王玫¹, 程晓辉², 吕鹏翱²

1. 液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100;

2. 西安航天动力研究所, 西安 710100

* E-mail: liushang020160@aliyun.com

收稿日期: 2017-11-09; 接受日期: 2018-04-28; 网络版发表日期: 2018-12-26

摘要 结合高速摄影和脉动压力测量技术, 在模拟发动机供应系统动力学边界条件的基础上, 开展了某型文氏管非定常空化流动可视化实验研究. 获得了空化区详细的内部结构和脉动压力数据, 分析了空化区形态的变化和非定常特性. 结果表明: 随着空化数的降低, 文氏管流场从初生空化、膜状空化, 过渡至云状空化. 在云状空化阶段, 文氏管空化流场呈现出复杂的动态过程, 空化区可以划分为附着型环向气泡膜和脱落型气泡云. 附着型气泡膜作为一个整体, 相对较为稳定, 内部的压力波动很小. 脱落型气泡云上存在大块云团的断裂、脱落和溃灭过程, 产生明显的脉动压力峰, 脉动压力在频域上表现为无固定频率的宽频带. 空化区下游存在局部的高速逆向射流, 驱动附着型气泡膜长度不断缩短和伸长, 使得气泡膜的长度沿周向也出现明显的不一致. 在云状空化阶段, 文氏管下游系统出现了290~400 Hz范围的系统性自激振荡.

关键词 文氏管, 空化, 非定常, 可视化, 实验

1 引言

汽蚀文氏管是液体火箭发动机中常用的一种流量控制组件, 以用于提高推力和混合比的精度^[1]. 在工程实践中发现文氏管存在复杂的空化动态特性, 可能导致供应系统出现不利的压力振荡, 有必要对火箭发动机复杂供应系统中文氏管的非定常空化流动进行深入的研究.

对于基础性的水翼空化流动实验和数值模拟研究, 文献报道较多. 实验研究工作包括: 采用高速摄影技术观察水洞中水翼、钝体、收缩-扩张流道的绕流流场和空穴的非定常形态^[2~7], 分析水翼的升力信号的

时频特征^[4]和振动特性随空化数的变化规律^[5], 发现逆向二次流对钝体空化脱落形态的影响^[6], 研究收缩-扩张流道内云状空化发展过程产生的压力波动特性和主导频率^[7]. 数值模拟工作包括: 水翼绕流空化流动的瞬态特性数值计算^[8,9], 以及为提高非定常流场模拟精度, 发展了大涡模拟方法^[10], 改进了动态空化模型^[11,12].

对应用于发动机供应系统的文氏管和孔板的空化流动特性, 一些学者也开展了数值模拟^[13,14]和实验研究^[15~19]. 张小斌等人^[15]对液氧文氏管的空化特性进行数值计算, 考察了进出口压比对空化特性的影响. 赵东方等人^[16,17]搭建了一套液氮空化可视化实验台, 通过高速摄像机观察了文氏管在空化状态下的非定常特

引用格式: 刘上, 陈炜, 张兴军, 等. 文氏管非定常空化流动可视化实验研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 189–198

Liu S, Chen W, Zhang X J, et al. Visualization experimental study for venturi tube unsteady cavitating flows (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 189–198, doi: 10.1360/N092017-00387

性, 空化云团存在周期性的脱落, 文氏管出口压力和流量存在非定常的波动. Zhu等人^[18]分析了液氮文氏管的动态空化特性, 表明随着文氏管进、出口压力比的增大, 脱落频率和空化区长度线性增加, 而压力脉动的幅值接近于指数增大. Hitt等人^[19]对孔板在液氮供应管路中的空化不稳定现象进行了实验研究, 分析了空化振荡频率和振幅的变化.

对于叶轮机械中空化流动的动态现象, 近年来的研究也不断增多^[20-23]. 包括诱导轮^[20,21]和轴流泵^[22]的非定常空化流场数值模拟. Luo等人^[23]对水力机械中的空化研究进行了系统性总结, 介绍了最新发展的空化湍流流动的数值模型, 以及采用最新光学技术揭示流场参数所达到的成就.

对空化气泡的溃灭导致的空蚀作用, 一些学者也开展了基础性工作^[24-26]. 包括空泡溃灭产生压力脉冲的实验研究^[24], 气泡在文氏管流场中运动的数值模拟^[25], 两个空化气泡之间的相互作用和溃灭过程实验研究^[26].

根据上述文献, 对理想边界条件下二维水翼的空化特性研究较多, 对文氏管在复杂发动机供应管路系统中非定常空化研究很少, 采用高频脉动压力传感器直接测量空化区的动态压力特性也较少.

本文在相关文献基础上, 合理模拟了供应管路系统的入口、出口动力学边界条件, 结合高速摄影技术和脉动压力测量手段, 着重对文氏管在液体火箭发动机供应系统条件下的非定常空化特性开展实验研究, 分析其空化区内部形态和变化规律.

2 实验系统设计

文氏管空化流动可视化实验原理图如图1所示, 文

氏管采用透明的有机玻璃材料, 尺寸与某型发动机采用的全尺寸产品一致. 为了尽可能模拟文氏管在复杂火箭发动机供应系统中的非定常空化特性, 可视化文氏管的实验系统包括了发动机主导管、主阀门、推力室头腔和喷注器, 并在试验台上模拟该供应系统的入口和出口边界. 在主导管入口设置大压降的节流组件, 将节流组件设计为细直径的节流短管和多孔整流栅相结合的形式, 以模拟发动机中主导管入口近似为声学闭边界. 将推力室喷注器出口直接通外界, 以模拟发动机中喷注器出口近似为声学开边界.

为了充分掌握非定常空化过程产生的脉动压力, 在实验系统沿程尽量多地布置脉动压力测点. 在文氏管上游主导管沿程设置3个脉动压力测点, 沿流向代号分别为 $\Delta p_1 \sim \Delta p_3$. 为了直接测量空化区的压力脉动特征, 在透明文氏管喉部及扩张段设计两个脉动压力测点, 代号为 Δp_4 和 Δp_5 . 透明文氏管及测点如图2所示. 在文氏管下游主导管上沿程设置4个脉动压力测点, 沿流向代号别为 $\Delta p_7 \sim \Delta p_{10}$. 在文氏管的入口、出口处分别设置缓变压力测点, 分别为 p_{iq} , p_{eq} . 在试验台入口管、节流短管、推力室氧喷前腔处设置缓变压力测点, 代号分别为 p_{io} , p_{ik} , p_y . 通过在试验台上游设置标准节流喷嘴流量计, 测量汽蚀管的稳态流量. 实验过程中, 通过试验台上游的电动调节阀改变文氏管入口压力, 从而调节文氏管的流量.

实验高速摄影系统拍摄帧频为2000 Hz, 曝光时间为60 μs . 在高速摄影测量过程中, 冷光源与高速摄影机位于文氏管的同一侧. 所有脉动压力测点均采用瑞士Kistler公司的603B型压电式脉动压力传感器, 固有频率400 kHz, 加速度灵敏度: <10 Pa/g. 脉动压力测量系统采用BK公司3050采集模块, 输入频率范围: 0~51.2 kHz. 实验中脉动压力采样速率为8.192 kHz.

图1 文氏管液流实验原理图

图2 (网络版彩图)透明文氏管实验照片

文氏管的相对压力损失 δ 是描述文氏管工作状态的一个重要参数, 表示为

$$\delta = (p_{iq} - p_{eq}) / p_{iq} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, p_{iq} 为文氏管入口的静压力, p_{eq} 为文氏管出口的静压力.

文献中常采用无量纲的空化数描述空化流动. 对于文氏管, 空化数 σ 表示为^[25]

$$\sigma = \frac{p_{iq} - p_v}{1/2 \rho_l u_t^2}, \quad (2)$$

式中, p_v 为当前温度下液体介质的饱和蒸汽压, ρ_l 为液体介质的密度, u_t 为喉部处液体的流速.

透明文氏管的喉部内径为 $\Phi 37.09$ mm, 入口收敛角为 60° , 出口扩张角为 8° . 实验介质为水, 水温为 20°C , 对应饱和蒸汽压为 2.3388 kPa. 在实验中, 通过试验台上的调节阀增大文氏管入口压力, 逐步增大文氏管的稳态流量, 可计算出在不同工况下的文氏管的相对压力损失和空化数.

3 结果与分析

3.1 不同工况下空化形态分析

在不同稳态流量工况下, 根据文氏管入口、出口压力在 10 s内的平均值, 获得文氏管的相对压力损失和空化数如表1所示.

由表1可得, 随着文氏管流量的增大, 文氏管的相对压力损失增大, 空化数降低. 在不同的空化数(即文氏管流量)下, 高速摄影获得文氏管空化区的瞬时图像如图3所示. 由于空化产生大量气泡, 对光线的反射作

表1 文氏管实验参数

Q_m (kg/s)	p_{iq} (MPa)	p_{eq} (MPa)	相对压力损失 δ	空化数 σ
5.60	0.13389	0.11195	16.39%	9.80
6.07	0.13742	0.11281	17.90%	8.55
6.50	0.14131	0.11367	19.56%	7.67
7.11	0.14974	0.11444	23.57%	6.81
7.63	0.15939	0.11521	27.72%	6.30
8.07	0.16785	0.11596	30.92%	5.92

图3 不同空化数下文氏管的流场图像

用增强, 图3中文氏管扩张段内白色高亮部位即为空化气泡. 可见在表1的工况下, 文氏管内均出现了空化现象. 随着文氏管空化数的降低, 即流量和相对压力损失的增大, 文氏管空化区的范围不断扩大.

当 $\sigma=9.80$, 文氏管接近于临界空化状态. 在喉部下游附近生成许多小气泡, 围绕喉部一周, 形成了一层薄的环向气泡群. 结合现场观察, 在喉部中心区无气泡生成, 环向气泡群紧贴喉部下游的壁面. 虽然单个气泡随机快速变动, 但气泡群作为一个整体, 变动幅度较小. 该状态属于初生空化阶段.

当 $\sigma=8.55$, 空化区域沿文氏管壁面向下游延伸, 环

向气泡群的轴向长度增大, 形成一圈环向气泡膜. 气泡膜的下游边缘已经拓展至喉部下游第一个脉动压力传感器位置. 空化区的整体轴向长度随时间变化不大. 在气泡膜下游边缘存在小幅波动, 并不断剥离出“气泡丝”, 形成更加细小的气泡, 最终消失的主流液体中. 将该状态定义为膜状空化阶段.

随着空化数的降低, 空化区的范围继续延伸. 由图3(c)~(f), 在空化数 <7.67 的范围, 可以将空化区划分为两个部分: 附着型气泡膜和脱落型气泡云. 喉部附近众多条形气泡沿周向聚集一起, 形成一层覆盖整个喉部下游的环向气泡膜, 气泡膜内为气相, 相对较为稳定. 在气泡膜的下游边缘, 气泡膜破碎为大量的小气泡, 众多小气泡聚集形成了气泡云. 气泡云的动态过程非常强烈, 内部结构混乱, 频繁出现云团的破碎、脱落、溃灭和混合过程. 该区域为气液两相交替区, 气液两相之间存在剧烈的能量交换过程. 该状态属于云状空化阶段.

当 $\sigma=7.67$, 附着型气泡膜的轴向长度覆盖了 Δp_4 测点的大部分区域. 虽然观察到气泡膜内部在每一帧图像中都不断变动, 但气泡膜作为一个整体较为稳定, 气泡膜的轴向长度随时间只是小幅的波动. 在气泡云团的下游边缘, 剥离出的大量“气泡丝”, “气泡丝”在向下游的流动过程中迅速消散. 残余的微小气泡在液相中形成一种“气泡雾”, “气泡雾”最终消失在文氏管的扩张段中.

当 $\sigma=6.81$, 附着型气泡膜的轴向长度已经完全将 Δp_4 测点覆盖. 随空化数的继续降低(文氏管流量增大), 气泡膜的长度和气泡云的轴向范围都继续增大. 观察到空化区的动态过程更加剧烈, 存在大块的云团从整体气泡云上脱落的情况, 附着型气泡膜的长度沿周向出现了明显的不一致.

随着空化数进一步降低, 空化程度继续加深, 空化区范围不断扩大, 非定常特性更加显著. 在下节中, 以 $\sigma=6.30$, 5.92 为例, 分析云状空化阶段的非定常特性.

3.2 云状空化非定常形态分析

图4为 $\sigma=6.30$ 时连续6帧的动态图像. 随着空化程度的加深, 从气泡云下游脱落的“气泡丝”已接近 Δp_5 测点. 气泡云内存在大块云团的断裂、脱落和上下翻滚等复杂过程. 图4中空化区右上方的大块云团从断裂至消失的时间约 2.5 ms . 在云团的脱落过程中, 伴随着

图4 $\sigma=6.30$ 时云状空化的非定常形态

内部气泡的溃灭和气相的凝结, 导致大块云团逐步破碎、变细, 形成“气泡丝”和“气泡雾”, 在文氏管的扩张段内充满了微小气泡形成的“气泡雾”. 大块云团的脱落, 气、液两相之间强烈的能量交换, 驱动着附着型气泡膜沿轴向长度出现了延伸和缩短, 气泡膜长度沿周向的不一致性更加明显, 如图4中气泡膜在下部的长度约为上部的两倍.

图5为 $\sigma=5.92$ 时连续8帧的动态图像. 空化区的最大长度已超过 Δp_5 测点位置, 空化区占据了文氏管扩张段的大部分区域, 气泡云占空化区的比例也更大. 不断出现大块云团的断裂和脱落过程, 图5中大块云团从开始断裂至消失的时间约 3.5 ms . 虽然该工况下空化区的动态过程很剧烈, 但喉部下游附着型气泡膜在周向上仍是完整的, 未出现气泡膜整体性断裂和脱落的情况.

文献[5,7,16,18]报道水翼、二维的收缩-扩张通道、小尺寸文氏管在云状空化阶段, 通过图像的观察, 空化云的脱落和空化区的长度具有准周期性. 由于本实验中发动机主供应系统的文氏管尺寸较大, 云状空化流动在周向上的非对称性很明显, 非定常空化图像的复现性很差, 仅从高速摄影图像中, 难以明显地判

图 5 $\sigma=5.92$ 时云状空化的非定常形态

别出空化云脱落的准周期性, 需进一步通过脉动压力测量数据分析云状空化的频率特性。

许多学者通过数值研究及实验认为^[7,14,16,18], 空化区下游边缘的逆向压力梯度产生了沿壁面从下游到上游的逆向射流, 并导致空化云的断裂和脱落。本实验中也观察到逆向射流的存在, 如图6所示。逆向射流插入空化区和壁面之间, 最远推进至附着型气泡膜的中部, 导致气泡膜后半部分瞬时脱离壁面, 但未出现附着型气泡膜断裂的现象。从图6观察到, 逆向射流并不是周向对称的, 而是具有明显的局部特性。图6(a)中逆向射流出现在空化区下方, 而图6(b)中逆向射流出现在空化区上方。受逆向射流的挤压, 当地局部液体静压升高, 局部的空化云消失, 并使附着型气泡膜轴向长度缩短。通过气泡膜轴向长度的变化, 计算出图6(a)中逆向射流前锋在0.5 ms内最大速度为29.5 m/s, 图6(a)中

图 6 (网络版彩图) $\sigma=5.92$ 时逆向射流与空化区的相互作用。(a) 在空化区底部的逆向射流; (b) 在空化区上方的逆向射流

逆向射流前锋最大速度为35.2 m/s, 该速度远高于当前喉部主流的平均正向流速7.5 m/s。当逆向射流前锋达到最远点之后, 在正向主流的驱动下, 附着型气泡膜长度重新恢复性延长。

根据上述现象, 进一步分析可知, 在逆向射流的作用下, 附着型气泡膜局部长度不断缩短和伸长, 使得整个空化区气相的总体积不断缩小和扩大, 构成了整个文氏管液流系统空化不稳定的激励源。另外, 逆向射流的局部特性将导致空化区尾部在周向也存在很大的压力梯度, 该压力梯度可能是气泡云团出现断裂、脱落和翻滚的驱动力。

3.3 脉动压力时域分析

在实验过程中, 同步测量了文氏管的流量和上、下游的脉动压力等参数。结合高速摄影图像和脉动压力数据对文氏管的非定常过程进行分析。图7(a)为文氏管稳态流量从4.5 kg/s阶梯形递增至6.5 kg/s, 图7(b)为从6.5 kg/s阶梯形递增至8.1 kg/s过程。图8为文氏管流量增大过程中, 文氏管扩张段及下游管路上脉动压力的时域变化。其中, 图8(a)与图7(a)为同一组测量数

图7 文氏管流量递增过程. (a) 4.5~6.5 kg/s流量递增过程; (b) 6.5~8.1 kg/s流量递增过程

图8 流量递增过程中脉动压力时域变化. (a) 流量4.5~6.5 kg/s递增过程; (b) 流量6.5~8.1 kg/s递增过程

据图8(b)与图7(b)为另一组数据, 流量参数与脉动压力数据的时域一致. 脉动压力 p_4' , p_5' , p_7' 即为压电式传感器测点 Δp_4 , Δp_5 , Δp_7 获得的数据. 实验过程中, 通过调节试验台上游调节阀, 流量按照阶梯形逐步增大, 前文中的高速摄影图像分别在对应的流量稳定段拍摄.

由图7(a)和图8(a)可得, 当文氏管流量稳态值超过5.5 kg/s(对应时间约68 s), 文氏管喉部附近的脉动压力 p_4' 的时域波动幅值有所增大, 并且是负向波动幅值增大. 在70~110 s之间, 流量稳态值为5.60 kg/s($\sigma=9.80$), 根据高速摄影图像, 文氏管处于初生空化阶段. 因此, 通过文氏管喉部的脉动压力 p_4' 幅值的变化可以判断, 实验条件下, 该文氏管的临界空化流量为5.5 kg/s.

随着文氏管稳态流量的增大, 脉动压力 p_4' 的时域波动幅值继续增大. 当流量稳态值为6.07 kg/s($\sigma=8.55$, 对应时间段为124~144 s), 脉动压力 p_4' 的正向波动幅值增加明显, 与负向波动幅值相当. 此时文氏管处于膜状空化阶段. 当流量稳态值超过6.3 kg/s(对应147 s之后), 脉动压力 p_4' 的正向波动幅值继续增加, 而 p_4' 的负向波动幅值迅速减小, 甚至低于空化之前的负向波动幅值. 对应高速摄影图像, 附着型气泡膜的轴向长度覆盖了 Δp_4 测点大部分区域. 在图7(a)中流量变化范围内, 文氏管扩张段的脉动压力 p_5' 和文氏管下游管路上脉动压力 p_7' 的幅值未出现明显变化.

由图7(b)和图8(b)可得, 当文氏管稳态流量从

6.5 kg/s 增大至 8.1 kg/s 的过程中, 文氏管相关的脉动压力参数变化过程与图 8(a) 存在很大的差异. 当文氏管稳态流量超过 6.6 kg/s (19 s 之后), 图 8(b) 中脉动压力 p_4' 的正向幅值和负向幅值都迅速降低, 且明显低于下游的脉动压力 p_5' 和 p_7' 的时域幅值. 当稳态流量达到 7.11 kg/s ($\sigma=6.81$, 37 s 之后), 脉动压力 p_4' 大部分时间内波动很小, 只是偶尔出现一次脉动压力峰. 结合高速摄影图像, 空化区的附着型气泡膜已经完全将 Δp_4 测点覆盖, 附着型气泡膜内基本是气相, 其压力为液体的饱和蒸汽压, 因而无明显压力波动. 随着文氏管流量的逐步增大, 图 8(b) 中文氏管扩张段的脉动压力 p_5' 波动幅值增大明显, 文氏管下游管路上脉动压力 p_7' 波动幅值也逐渐增大. 这是由于流量持续增大, 空化数降低, 空化区的范围扩大, 气泡云团的动态过程更加强烈.

进一步, 在文氏管稳态流量为 6.07, 6.50, 8.07 kg/s

时 (对应 $\sigma=8.55, 7.67, 5.92$), 放大相关脉动压力参数的时域波形, 如图 9 所示.

图 9(a) 中, 脉动压力 p_4' 的幅值显著超过 p_5' 和 p_7' 的时域幅值, p_4' 的正向幅值与负向幅值相当, 波动过程无明显固定周期. 对应于图 3(b) 中膜状空化阶段, 空化区的下游边缘刚好达到脉动压力测点 Δp_4 位置. 此时在该传感器位置处, 存在大量小气泡的脱落、缩小、溃灭等局部动态过程, 导致该位置出现明显的压力波动. 由于下游的脉动压力测点距空化区较远, 受其影响较小.

图 9(b) 中, 脉动压力 p_4' 的负向波动幅值很小, 正向存在短时较大的压力脉动峰. 根据图 3(c) 中高速摄影图像, 由于 Δp_4 脉动压力测点的大部分区域被附着型气泡膜覆盖, 当地最低压力受气泡膜中饱和蒸汽压的限制, 使得脉动压力 p_4' 的负向波动很小. 当 Δp_4 测点短

图 9 不同流量的部分脉动压力时域波形. (a) 6.07 kg/s 流量, $\sigma=8.55$; (b) 6.50 kg/s 流量, $\sigma=7.67$; (c) 8.07 kg/s 流量, $\sigma=5.92$

时间未被气泡膜完全覆盖, 气泡云中气泡溃灭等过程产生的压力峰被 Δp_4 测点感知, 导致 p_4' 数据中存在短时较高的压力脉动峰, 压力脉动峰无明显间隔周期。

图9(c)中, 脉动压力 p_4' 的波动很微弱, p_5' 的波动幅值最大, 频繁地出现短时较高的压力峰。文氏管下游脉动压力 p_7' 的波动呈现出一定的周期性。根据图3(f)中图像, Δp_4 脉动压力测点被附着型气泡膜完全覆盖, 气泡云的轴向范围达到了 Δp_5 测点, 气泡云边缘的脱落、溃灭等动态过程被 Δp_5 测点感知。 p_5' 数据中的大幅波动反映了气泡云内部的剧烈动态过程, 其中瞬时压力峰体现了局部云团的溃灭特征。

3.4 脉动压力频域分析

对测量的脉动压力数据进行短时FFT处理, 选取流量从6.5 kg/s递增至8.1 kg/s过程中(空化数从7.67降低至5.92), 部分脉动压力数据的瀑布图或色谱图如图10所示。

由图10(a)结合图8(b)得出, 在脉动压力 p_4' 存在明显波动的时段(20 s之前), 瀑布图中无明显固定频率, 主要频率分量集中在100 Hz以内的低频范围。结合图9(b)可知, p_4' 在时域上无周期性地出现短时较高的压力脉动峰, 在频域上表现出无固定频率的宽频带。

由图10(b)得出, 随着流量的增大, 脉动压力 p_5' 的分频幅值从很低值逐步增大。90 s之后, 在800 Hz的宽频范围都出现明显的分频幅值。 p_5' 的高幅值分量主要集中在100 Hz以内的低频范围, 也呈现出无固定频率的宽频带。在90 s之后, 文氏管的稳态流量超过7.6 kg/s, 逐渐增大至8.1 kg/s。从高速摄影图像可知, 该流量范围内, 空化区气泡云的边缘开始达到 Δp_5 测点位置。因此, 脉动压力 p_5' 的频谱特征反映了气泡云团的频率特性。结合高速摄影图像和图10(a)和(b)可得出, 由于气泡云团的动态过程受湍流和气液两相之间的相互作用, 大量微小气泡的生成、脱落、溃灭等处于一种随机变化状态, 从而在细观上未表现出固定的

图10 (网络版彩图) 6.5~8.1 kg/s流量变化中脉动压力频域分析。(a) 文氏管喉部处脉动压力 p_4' 瀑布图; (b) 文氏管扩张段脉动压力 p_5' 色谱图; (c) 文氏管下游脉动压力 p_7' 色谱图; (d) 文氏管下游脉动压力 p_{10}' 色谱图

频率.

由图10(c)和(d)得出, 在20 s之前(文氏管流量6.5 kg/s, $\sigma=7.67$), 文氏管下游管路上的脉动压力 p_7' 和脉动压力 p_{10}' 的幅值都很小. 在20 s之后($\sigma<7.67$), 对应云状空化阶段, 脉动压力 p_7' 和脉动压力 p_{10}' 的色谱图中出现了明显的特征突频带. 在实验范围内, 随着空化数的降低(流量的增大), 突频的幅值也增大, 频率值从约400 Hz降低至290 Hz. 在大流量的时间段(60~130 s), 在脉动压力 p_7' 的色谱图中可见高阶的突频带, 其中二阶频率在580 Hz附近.

文氏管下游管路上的脉动压力测点在文氏管云状空化阶段出现了特征频率, 即文氏管液流系统出现了空化自激振荡. 对比图10(c)和(d)的色谱图, 下游的脉动压力 p_{10}' 的幅值略高于 p_7' 的幅值. 分析认为该自激振荡由文氏管及其下游供应系统共同决定的, 是一种系统性的自激振荡. 空化区内气液两相的相互作用为系统性的自激振荡提供了驱动能量.

4 总结

通过对某型文氏管的非定常空化流动开展可视化

实验研究, 清晰地获得了文氏管空化区的详细内部结构. 获得结论如下:

(1) 随着空化数的降低, 空化区的范围不断延伸, 动态过程越加剧烈, 文氏管空化流场从初生空化、膜状空化, 过渡至云状空化阶段.

(2) 云状空化区可划分为两个部分: 附着型环向气泡膜和脱落型气泡云. 附着型气泡膜作为一个整体, 相对较为稳定; 而气泡云内部存在大量的破碎、脱落、溃灭和混合等复杂过程.

(3) 在云状空化阶段, 大块云团从脱落型气泡云上断裂和脱落, 逐步破碎、溃灭; 附着型气泡膜的长度沿周向呈现明显的不一致性; 空化区下游存在局部的高速逆向射流, 驱动附着型气泡膜长度不断缩短和伸长, 构成了文氏管液流系统空化不稳定的激励源.

(4) 脱落型气泡云的局部脱落、溃灭等局部动态过程, 产生了明显的脉动压力峰, 在频域上表现为无固定频率的宽频带; 而附着型气泡膜内的压力波动很小.

(5) 在云状空化阶段, 文氏管下游系统出现了290~400 Hz范围的自激振荡, 频率特性不同于气泡云内局部的动态过程, 是一种系统性的自激振荡.

参考文献

- 任汉芬, 刘国球, 朱宁昌, 等. 液体火箭发动机原理. 北京: 中国宇航出版社, 2005
- 李向宾, 王国玉, 张敏弟, 等. 绕Hydronautics水翼空化漩涡的高速录像观察. 工程热物理学报, 2006, 27: 426-428
- 尹必行, 康灿. 绕水翼空化流场的数值模拟与试验研究. 机械工程学报, 2012, 48: 146-151
- 张博, 王国玉, 黄彪, 等. 绕水翼空化非定常动力特性的时频分析. 实验流体力学, 2009, 23: 44-49
- 高远, 黄彪, 吴钦, 等. 绕水翼空化流动及振动特性的实验研究. 力学学报, 2015, 47: 1009-1016
- Hu C, Wang G, Huang B. Experimental investigation on cavitating flow shedding over an axisymmetric blunt body. *Chin J Mech Eng*, 2015, 28: 387-393
- 陈广豪, 王国玉, 黄彪. 云状空化的非定常流体动力特性. 船舶力学, 2016, 20: 1-9
- Huang B, Wang G Y. A modified density based cavitation model for time dependent turbulent cavitating flow computations. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 1985-1992
- Huang B, Wang G Y, Zhao Y, et al. Physical and numerical investigation on transient cavitating flows. *Sci China Technol Sci*, 2013, 56: 2207-2218
- 赵宇, 王国玉, 黄彪, 等. 非定常空化流动涡旋运动及其流体动力特性. 力学学报, 2014, 46: 191-200
- Zhao Y, Wang G, Huang B. A cavitation model for computations of unsteady cavitating flows. *Acta Mech Sin*, 2016, 32: 273-283
- Zhang X B, Zhang W, Chen J Y, et al. Validation of dynamic cavitation model for unsteady cavitating flow on NACA66. *Sci China Technol Sci*, 2014, 57: 819-827
- Xu C, Heister S D, Field R. Modeling cavitating venturi flows. *J Propulsion Power*, 2002, 18: 1227-1234
- Ahuja V, Hosangadi A. Simulations of cavitation in orifice and venturis. PVP 2007-26639
- 张小斌, 曹萧丽, 邱利民, 等. 液氧文氏管空化特性计算流体力学研究. 化工学报, 2009, 60: 1638-1643

- 16 赵东方, 朱佳凯, 徐璐, 等. 文氏管中低温流体空化过程可视化实验研究. *低温工程*, 2015, 6: 56–61
- 17 赵东方. 液氮文氏管空化动态特性可视化实验研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2016
- 18 Zhu J, Xie H, Feng K, et al. Unsteady cavitation characteristics of liquid nitrogen flows through venturi tube. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 112: 544–552
- 19 Hitt M, Lineberry D, Ahuja V, et al. Experimental investigation of cavitation induced feedline instability from an orifice. AIAA 2012-4209, 2012
- 20 陈晖, 李斌, 张恩昭, 等. 液体火箭发动机高转速诱导轮旋转空化. *推进技术*, 2009, 30: 390–395
- 21 Okita K, Ugajin H, Matsumoto Y. Numerical analysis of the influence of the tip clearance flows on the unsteady cavitating flows in a three-dimensional inducer. *J HydroDyn Ser B*, 2009, 21: 34–40
- 22 Zhang R, Chen H. Numerical analysis of cavitation within slanted axial-flow pump. *J HydroDyn Ser B*, 2013, 25: 663–672
- 23 Luo X, Ji B, Tsujimoto Y. A review of cavitation in hydraulic machinery. *J HydroDyn Ser B*, 2016, 28: 335–358
- 24 王国刚, 孙冬柏, 张秀丽, 等. 空泡溃灭过程中力学损伤行为. *北京科技大学学报*, 2007, 29: 483–485
- 25 Cai J, Huai X, Li X. Dynamic behaviors of cavitation bubble for the steady cavitating flow. *J Therm Sci*, 2009, 18: 338–344
- 26 Luo J, Xu W L, Li R. High-speed photographic observation of collapse of two cavitation bubbles. *Sci China Technol Sci*, 2016, 59: 1707–1716

Visualization experimental study for venturi tube unsteady cavitating flows

LIU Shang¹, CHEN Wei¹, ZHANG XingJun², ZHAO RuiGuo¹, WANG Mei¹, CHENG XiaoHui² & LÜ PengXuan²

¹ *Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an 710100, China;*

² *Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China*

A visualization experiment of a venturi tube unsteady cavitating flows was conducted, by combining high speed visualization and dynamic pressure measurement technology, on the base of simulating the dynamical boundary conditions of the engine feed system. The detailed interior structure of cavitating flows and the pressure fluctuation data were captured. The variation of cavity shapes and the unsteady characteristics were analyzed. The experiment results indicate that as the cavitation number decreases, the venturi tube cavitating flow is changed from inception cavitation to film cavitation, and to cloud cavitation. At cloud cavitation stage, the venturi tube cavitating flows are revealed as some very complex dynamical processes. The cloud cavitating zone can be divided as attached annular cavity film and detached cavity cloud. The attached cavity film is relatively stable as a whole, and its inner pressure fluctuation is really little. It is found that large part of cavity cloud is breaking and shedding from the total detached cavity cloud, and is going to collapse. These processes induce evident pressure fluctuation pulses, which have wide frequency range but not fixable frequency peak in the frequency region. At the aft end of the cavity cloud, the local high velocity re-entrant flow is discovered, which drives the axial length of attached cavity film shortening and extending, and induces the film length obviously unequal along the circle. The self-oscillation of 290–400 Hz also takes place at the downstream system of venturi tube, at the cloud cavitation stage.

venturi tube, cavitation, unsteady, visualization, experiment

doi: [10.1360/N092017-00387](https://doi.org/10.1360/N092017-00387)