DOI: 10.3901/JME.2019.18.150

喷嘴出口结构参数对风琴管射流空化作用的影响*

蔡腾飞 潘岩 马飞 邱林宾 徐平平
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 风琴管射流的空化作用虽由其振荡特性诱发,但受制于其出口结构,出口结构对空化作用的影响一直被忽视。首先从射流空化作用机理出发,分析风琴管喷嘴出口边界层流动特性,揭示喷嘴出口结构与空化作用的内在联系。基于水声学原理,采用噪声信号分析法研究了相同空化数下出口结构参数对风琴管射流空化作用的影响,探究不同空化数下出口结构参数对射流空化作用的影响规律。试验结果表明,流道长度 L_1 、扩口长度 L_2 及扩口角度 θ 等喷嘴出口结构参数对射流空化作用效果均产生显著影响, L_1 仅对射流空化作用产生直接影响, L_2 仅对射流空化作用产生间接影响,而 θ 对射流空化作用产生双重影响; L_1 、 L_2 及 θ 对射流空化作用的影响具有明显的规律性,均存在合理的取值范围,在该范围内射流空化作用效果较佳。风琴管射流的高频振荡特性只是自振射流发生空化作用的前提条件,而喷嘴的出口结构在一定程度上决定着自振射流的实际空化作用效果。

关键词: 喷嘴; 出口结构; 风琴管射流; 空化作用; 空化噪声

中图分类号: TG156

Effects of Outlet Geometry of Organ-pipe Nozzle on Cavitation Due to Impingement of the Waterjet

CAI Tengfei PAN Yan MA Fei QIU Linbin XU Pingping

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Although cavitation of the organ-pipe waterjet is induced by its oscillation, it depends on the outlet geometry of organ-pipe nozzle, which has been neglected. Based on the cavitation mechanism of the organ-pipe waterjet, the boundary layer flow characteristics through the nozzle outlet are analyzed, then the relationship between the nozzle outlet geometry and cavitating generation is revealed. The effect of the nozzle outlet geometry on jet cavitation under the same cavitation number is investigated using the noise signal method, and its influence under different cavitation numbers is also explored. The experimental results show that the nozzle outlet parameters including the throat length L_1 , flaring length L_2 and flaring angle θ have a significant impact on jet cavitation performance. L_1 influences the jet cavitation directly, L_2 can only influence the cavitation by the jet oscillation, while θ has a dual effect mentioned above. The effects of these parameters on jet cavitation have obvious trends, and there exist reasonable value ranges, within which the jet has a strong cavitation effect. High-frequency oscillation is just the precondition for the self-resonating waterjet to induce cavitation, while to some extent, the nozzle outlet geometry determines the actual cavitation performance of waterjet.

Key words: nozzle; outlet geometry; organ-pipe waterjet; cavitation; cavitation noise

0 前言

近年来,随着深海资源开采技术的不断进步,风琴管射流的空化冲蚀特性愈来愈受到人们的重视。风琴管射流是一种自振射流,因喷嘴出口流体涡振引起射流的剧烈振荡,进而产生空化作用,在

围压环境下具有极强的冲蚀破坏能力。为了增强自振射流的空化效果,国内外学者针对自振射流的空化作用开展了大量卓有成效的研究。

对自振射流空化作用的重视,最早起始于风琴管射流振荡特性的研究。CONN等^[1-2]发现自振射流可诱发强烈的空化作用,在高围压下具有比普通射流更强的冲蚀性能,并将风琴管射流作为一种典型自振射流,应用于石油钻井中。CHAHINE等^[3]阐明了风琴管射流空化作用的产生机理及风琴管喷嘴的设计准则,

* 国家自然科学基金(51774019)和国家“十二五”(DY125-14-T-03)资助项目。20180605收到初稿,20181214收到修改稿

同时研究了空化数、流速等参数对射流空化作用的影响。LI 等^[4]通过试验研究了风琴管喷嘴谐振腔结构、围压等参数对风琴管射流空化特性的影响。易灿等^[5]研究了围压下风琴管射流的空化特性,并探究了喷嘴谐振腔结构对起始空化数的影响。马飞等^[6]采用喷嘴腔内流体检测法,研究了来流扰动、流速等参数对风琴管射流频率特性的影响及变化规律。李登等^[7-8]研究了风琴管喷嘴谐振腔内表面粗糙度、喷嘴入口结构不连续性等对射流振荡特性的影响,并通过冲蚀试验研究了不同工况下空化作用与靶距之间关系。

上述研究表明,风琴管射流具有高频的振荡特性和强烈的空化作用,且其空化作用由振荡特性诱发,故目前对风琴管射流的空化特性研究大多从射流振荡角度出发。而实际上射流的空化作用效果不仅与射流的振荡特性有关,还受制于喷嘴出口结构,但由于喷嘴出口总被认为是喷嘴整体结构的一部分,仅与射流自激振荡的产生有关,其在射流空化作用中的重要性一直被忽视。

JOHNSON 等^[9]在早期研究中就发现喷嘴出口长度、扩口角等参数对风琴管自振射流的空化作用产生显著影响,但并未引起人们的重视。孙宝江等^[10-11]对风琴管喷嘴出口流道进行了研究,认为喷嘴出口流道结构对空化作用效果的增强起到重要作用,喷嘴出口长度的减小有利于提高射流的振荡幅值及空化效果。上述研究表明风琴管喷嘴出口结构对射流的空化作用具有重要影响,但未给出影响规律,且内在机理不清,因此制约了自振射流工作效率的进一步提高。

针对上述问题,本文从风琴管射流空化形成机理入手,分析喷嘴出口流体边界层特征,探讨在喷嘴出口与标靶之间区域内空化的初生及其演化规律。在此基础上,通过试验研究喷嘴出口结构参数对风琴管射流空化作用的影响,并揭示出口参数与空化作用效果之间的变化规律。

1 风琴管射流空化作用机理

1.1 射流的空化作用

空化作用是指液体中气泡核在低压区产生,在高压区溃灭,当溃灭发生在物体表面附近时,其产生的瞬间冲击载荷将对物体表面材料造成极强的破坏作用^[12]。在射流的空化作用研究中,通常采用无量纲空化数 σ 表示其发生空化的趋势,即

$$\sigma = \frac{P_c - P_v}{0.5 \rho v^2}$$

式中, P_c 为环境围压(Pa), P_v 为液体饱和蒸气压(Pa), v 为射流出口流速(m/s), ρ 为液体密度(kg/m³)。

给定某一射流,存在临界空化数 σ_c , 仅当 $\sigma \leq \sigma_c$ 时,才会出现空化现象;且 σ 越小,空化越易发生^[5]。一般通过喷嘴结构的合理设计,增大射流的临界空化数 σ_c , 来提高射流的空化作用效果。

风琴管射流具有高频高幅的压力振荡特征,剧烈的压力振荡产生交替变化的低压区及极高的压力梯度,从而诱发大量气泡析出,并促使其充分生长。因此,风琴管射流具有比普通射流更高的空化初生能力,在高围压下仍可产生强烈的空化作用。

1.2 喷嘴出口边界层流动分析

低压区的形成是空化初生及发展的必要条件,为此,在风琴管喷嘴收缩流道后,连接着具有一定扩散角度与长度的扩口结构,将出口射流分成了三个区域:突缩区,扩口区和外流体区,如图1所示。先缩后扩的出口结构有利于低压区的形成。

图1 喷嘴出口边界层流动示意图

在突缩区,由于出流断面收缩,壁面边界层发生流动分离,在图1中A区域形成负压区(涡环空腔),同时流体与壁面相互作用促使涡环的产生,从而诱发空泡析出,即空化初生^[13]。

在扩口区,扩口角度与长度合适时,在高速射流与周围流体的强剪切作用及附壁效应下,由流道突缩区产生的涡环在此得到加强,涡环中心处压力大幅降低,提高了空化初生能力^[14]。

在外流体区,以一定频率脱落的涡环,在射流周向发展为垂直于射流流动方向的大结构涡环,同时因上述环状涡破裂融合,沿射流剪切层亦有大量的线状涡产生。涡环中心压力降低,进一步促进空化的产生,显著提高空泡密度。大量空泡跟随射流向下游运动,当靶距恰当时,在标靶处破裂和溃灭,空化冲蚀效果得以增强^[15]。

上述分析表明,喷嘴出口结构决定出口边界层特征,而边界层的不同区域内包含着空化初生、发展及溃灭的全过程,因此出口结构对射流空化作用

产生显著影响。同时空化效果也同环境围压与靶距密切相关,故本文在一定的出口区域条件,如恰当的围压、靶距下,针对喷嘴出口结构对空化作用的影响展开研究。

2 试验装置

自振射流的空化作用效果通常由标靶空化冲蚀量或者打击时产生的空化噪声强度来表征^[16],本文采用后者作为评判手段。射流发生强烈空化作用时,将伴随着高频的空化噪声辐射,其信号强弱与空化冲蚀性能具有较好的一致性^[17]。此外,该方法能够实现射流空化作用的实时监测^[18],故本文采用空化噪声分析法对射流空化作用效果进行试验研究。

2.1 试验系统

试验测试系统如图 2 所示,主要由水箱、高压泵、压力表、流量计、风琴管喷嘴、高压釜、标靶、溢流阀、控制台、伺服电机、传感器和数据采集器等组成。在高压釜内喷嘴出水口处平行布置水听器(7),用于空化噪声信号的采集;在高压釜壁面布置压力传感器(8),获取围压参数;各传感器均与数据采集器(9)相连。试验时通过控制变频器、溢流阀及伺服电机,实现工作压力、围压、靶距等参数的自动调节,试验数据经计算机在线分析与处理后,实时显示并记录射流空化状态。

图 2 试验测试系统

1. 水箱 2. 高压泵 3. 高压釜 4. 打击靶盘 5. 风琴管喷嘴装置
6. 高频压力传感器 7. 水听器 8. 压力传感器 9. 数据采集器
10. 计算机 11. 伺服电机 12. 溢流阀 13. 数控操作台

2.2 喷嘴结构及试验参数

试验采用风琴管喷嘴,为了便于喷嘴出口参数调整,将喷嘴出口结构部分设计成可互换的喷片,如图 3 所示。喷嘴出口结构(喷片)由圆柱形流道及扩口段结构组成,见图 3b。喷嘴出口直径为 d ,圆柱形流道长度为 L_1 ,扩口长度为 L_2 ,扩口角度为 θ 。喷嘴谐振腔长度为 L 、直径为 D 。

图 3 喷嘴结构示意图

由涡激振动理论可知,当射流的自激频率与风琴管谐振腔声谐振动频率相匹配时,射流达到自激共振状态,此时射流具备最佳空化作用的条件^[3]。为此,在试验过程中尽量保持射流处于自激共振状态。

试验时,合理配置打击靶距及喷嘴谐振腔结构,通过调节空化数,使射流达到自激共振状态^[19];保持靶距和喷嘴谐振腔结构不变,改变喷嘴出口结构参数(即更换喷片),进而获得喷嘴出口参数对射流空化作用的影响。

试验采用靶距为 $3d$,风琴管喷嘴的谐振腔结构参数见表 1,表中 f 为喷嘴的声谐振动频率^[20]。

表 1 喷嘴结构参数及声谐振动频率

谐振腔上端 直径 D_s /mm	喷嘴谐振腔 直径 D /mm	喷嘴谐振腔 长度 L /mm	喷嘴口径 直径 d /mm	频率 f /kHz
24	14	24	2	14.0

试验参数见表 2,试验分为 6 组:第 1、2 组保

表 2 试验参数

组次	来流压力 ΔP /MPa	空化数 σ	流道长度 L_1/d	扩口长度 L_2/d	扩口角度 $\theta/(\circ)$
1	14	0.13	0.3	1.4	20
		0.05	0.35		
		0.09	1.2		
2	14	0.13	0.25~1.2	1.4	20
		0.05			
		0.09			
3	14	0.13	0.35	1.4	2
					20
					30
					44
4	14	0.13	0.35	1.4	0~44
		0.05			
		0.09			
5	14	0.13	0.35	0.1	20
				1.4	
				2.0	
				3.0	
6	14	0.13	0.35	0.1~3.0	20
		0.05			
		0.09			

持扩口参数不变(L_2 , θ 不变), 改变出口流道长度 L_1 ; 第 3、4 组出口流道长度及扩口长度恒定(L_1 , L_2 不变), 改变扩口角度 θ ; 第 5、6 组出口流道长度及扩口角度恒定(L_1 , θ 不变), 改变扩口长度 L_2 。

3 试验结果与分析

3.1 风琴管射流空化作用表征

图 4 为水听器采集到的一组射流噪声信号, 试验参数为 $\sigma=0.13$, $\Delta P=14$ MPa。从时域图看, 射流工作中产生了强烈噪声, 其声压强集中在 ± 0.05 MPa 之间。

图4 噪声信号时域波形

图 5 为该噪声的功率谱图, 由谱图可看出, 噪声信号中含有大量 20 kHz 以上的高频噪声成分, 最高频率达到 100 kHz, 在 20~50 kHz 频段内噪声保持着很高的强度, 表明射流工作中发生了剧烈的空化作用, 产生了大量空化噪声^[19]。在低频段, 噪声信号功率谱中出现了三个主要峰值, 即 6.6 kHz、13.2 kHz 与 19.8 kHz, 且 6.6 kHz、19.8 kHz 分别为 13.2 kHz 的 0.5 倍频、1.5 倍频, 表明 13.2 kHz 为基频频率。由表 1 可知喷嘴的声谐振动频率约为 14 kHz, 依据三波共振理论^[21], 可判定 13.2 kHz 为风琴管射流的共振频率, 此时射流处于自激共振状态。在高频段, 功率谱幅值衰减较慢, 频率为 80 kHz 时幅值仍保持在 120 dB, 充分说明了空化噪声的宽频特性。

图5 噪声信号功率谱

上述分析表明, 本文试验测试系统具备产生强烈振荡射流的条件, 射流空化作用特征明显, 噪声

信号分析法用于表征射流的空化作用效果是完全可行的。

3.2 出口流道长度 L_1 对射流空化作用影响

为了研究喷嘴出口流道长度 L_1 对风琴管射流空化作用的影响, 采用表 2 第 1 组参数进行试验, 得到 $\sigma=0.13$ 条件下不同 L_1 的射流噪声功率谱, 如图 6 所示。

图6 不同出口流道长度 L_1 的射流噪声功率谱

由图 6 可见, 射流噪声功率密度分布与 L_1/d 有关。当 $f < 50$ kHz 时, 不同 L_1 的射流噪声 PSD 分布基本相同, 说明 L_1 对射流的振荡特性影响小。当 $f \geq 50$ kHz 时, 不同 L_1 的射流噪声 PSD 分布差别较大, $L_1/d=0.3$ 、 $L_1/d=1.2$ 喷嘴, 其射流噪声 PSD 迅速降至 90 dB, 而 $L_1/d=0.35$ 喷嘴, 其射流噪声 PSD 缓慢降低, 且频带较宽。在高频段, 噪声 PSD 分布上的差异, 说明 L_1 对射流的空化作用影响较大。

为进一步研究 L_1 的影响规律, 采用表 2 第 2 组参数进行试验, 得到不同空化数 σ 下噪声声压级随 L_1 变化趋势, 如图 7 所示。

图7 不同 σ 下噪声声压级随 L_1/d 变化关系

由图 7 可看出, 不同 σ 条件下射流声压级随 L_1 的变化规律基本一致, 即射流的噪声 SPL 均随 L_1/d 的变化先增大而后减小。当 $L_1/d=0.35$ 时, 不同 σ 条件下射流的噪声声压级均达到最大值。

上述分析表明, L_1 对风琴管射流的空化作用产生直接影响, 但其对射流的振荡特性影响很小; 随

L_1/d 的增大, 空化作用效果先增强而后逐渐衰减, $L_1/d=0.35$ 时, 空化作用最强。

3.3 扩口角度 θ 对射流空化作用影响

为研究喷嘴扩口角度 θ 对风琴管射流空化作用的影响, 采用表 2 第 3 组参数进行试验, 得到 $\sigma=0.13$ 条件下不同 θ 的射流噪声功率谱如图 8 所示。

图 8 不同扩口角度 θ 的射流噪声功率谱

由图 8 可看出, θ 对射流噪声 PSD 分布有显著影响。在 $f < 30$ kHz 低频段, $\theta=20^\circ$ 、 30° 喷嘴, 其射流噪声 PSD 均出现了明显的峰值频率, 射流发生了自激共振, 且二者的峰值频谱相同, 但射流噪声的能量分布不同; 而 $\theta=2^\circ$ 、 44° 喷嘴, 其射流噪声 PSD 无峰值频率, 射流处于非共振状态, 二者的射流噪声能量较弱, 相比于 $\theta=20^\circ$ 喷嘴, 其 PSD 值平均降低 40 dB 左右。在 $f \geq 30$ kHz 高频段, 即空化噪声段, $\theta=20^\circ$ 喷嘴产生的射流噪声 PSD 值平均高出非共振射流($\theta=2^\circ$ 、 44°)约 30 dB, 且频带较宽。

为进一步研究 θ 的影响规律, 采用表 2 第 4 组参数进行试验, 得到不同 σ 下噪声声压级随 θ 变化曲线, 如图 9 所示。

图 9 不同 σ 下噪声声压级随 θ 变化关系

由图 9 可见, 在 $0^\circ < \theta < 44^\circ$ 范围内, 不同 σ 下噪声声压级基本上随着 θ 的增大先增大后减小, 且 θ 存在合理的范围, 在该范围内空化效果较佳。 $\sigma=0.05$ 、 0.09 时, 在 $15^\circ < \theta < 30^\circ$ 范围内, 噪声声压级均较高。 $\sigma=0.13$ 时, 在 $15^\circ < \theta < 24^\circ$ 范围内, 噪声声压级较高, 当 $\theta \geq 24^\circ$ 时, 噪声声压级出现急剧下跌,

且随着 θ 增大, 空化作用越来越弱。

上述分析表明, 在 $20^\circ < \theta < 30^\circ$ 范围内, θ 仅对射流空化作用产生影响, 而对射流振荡特性影响很小, 而在 $\theta < 2^\circ$ 或 $\theta > 44^\circ$ 范围内, θ 对射流振荡特性产生较大影响, 进而对射流空化作用产生间接影响, 所以 θ 对射流空化作用产生双重影响。 θ 对空化作用的影响具有明显的规律性, $15^\circ < \theta < 24^\circ$ 时, 空化作用较强, 当 θ 很小或较大时, 空化作用很弱。

3.4 扩口长度 L_2 对射流空化作用影响

为研究喷嘴扩口长度 L_2 对风琴管射流空化作用的影响, 采用表 2 第 5 组参数进行试验, 得到 $\sigma=0.13$ 条件下不同 L_2 的射流噪声功率谱如图 10 所示。

图 10 不同扩口长度 L_2 的射流噪声功率谱

比较图 10 和图 8 可看出, 不同 L_2 与不同 θ 的射流噪声 PSD 分布具有相似性, 两参数对风琴管射流的振荡特性和空化作用均有较大影响。因 L_2 、 θ 同为喷嘴扩口部分参数, 故两者存在一定的关联性, 当 $L_2=0$ 时, θ 将不存在。

但是, L_2 对射流空化作用的影响也有不同。由图 10 可看出, $L_2/d=1.4$ 、 2.0 喷嘴, 其射流噪声 PSD 在低频段均出现了明显的峰值频率, 且噪声功率整体较强, 射流处于自激共振状态, 但二者的峰值频谱是不同的, 表明射流的振荡特性发生了改变; 而 $L_2/d=0.1$ 、 3.0 喷嘴, 其射流噪声 PSD 无峰值频率, 噪声能量普遍较弱, 射流处于非共振状态。

为进一步研究 L_2 的影响规律, 采用表 2 第 6 组参数进行试验, 得到不同 σ 下噪声声压级随 L_2 的变化规律, 如图 11 所示。由图可见, 噪声声压级随 L_2 增大先增大, 到达一定值后在一定范围内波动, 随后逐渐减小。在 $1 < L_2/d < 2$ 范围内, 不同 σ 下噪声声压级均较高, 即空化作用较强。而当 L_2/d 很小或较大时, 空化作用很弱, 甚至不发生空化作用。

图 11 不同 σ 下噪声声压级随 L_2/d 变化关系

上述研究表明, 喷嘴扩口长度 L_2 直接影响射流振荡特性, 进而对射流空化作用产生间接影响。 L_2 存在合理的取值范围, 在该范围内射流空化作用效果较佳。

有关喷嘴出口参数对射流振荡特性以及斯特劳哈尔数 S_d 的影响将在另一篇论文中进行深入探讨。

4 结论

(1) 采用空化噪声分析法, 通过试验对不同条件下风琴管射流的空化作用效果进行了研究, 结果表明喷嘴出口结构对风琴管射流空化作用具有显著影响。

(2) 出口流道长度 L_1 仅对射流空化作用产生直接影响。扩口长度 L_2 仅对射流空化作用产生间接影响。扩口角度 θ 在一定范围内对射流空化作用产生直接影响, 在其他条件下对射流空化作用产生间接影响, 故扩口角度 θ 对射流空化作用产生双重影响。有关 L_2 、 θ 对射流振荡特性的影响将在后续研究中进一步探讨。

(3) L_1 、 L_2 及 θ 对射流空化作用的影响具有明显的规律性, 较大或较小时空化作用均很弱, 但存在合理的取值范围, 在该范围内射流空化作用效果较佳; 文中工况下, 合理的取值范围为: $L_1/d=0.35$, $1 < L_2/d < 2$, $15^\circ < \theta < 24^\circ$ 。

(4) 风琴管射流的高频振荡特性只是自振射流发生空化作用的前提条件, 而喷嘴的出口结构在一定程度上决定着自振射流的实际空化作用效果, 甚至决定了空化作用的产生与否。

参 考 文 献

[1] CONN A F, JOHNSON V E, LIU H, et al. Evaluation of CAVIJET cavitating jets for deep-hole rock cutting[R/OL]. Hydronautics, Inc., Laurel, MD, USA, 1981, No. SAND-81-7067.
[2] JOHNSON V E, LINDENMUTH W T, CONN A F, et al. Feasibility study of tuned-resonator, pulsating cavitating water jet for deep-hole drilling[R/OL]. Sandia National

Labs., Albuquerque, NM, USA; Hydronautics, Inc., Laurel, MD, USA, 1981, No. SAND-81-7126.

- [3] CHAHINE G L, JOHNSON V E. Mechanics and applications of self-resonating cavitating jets[C]// International Symposium on Jets and Cavities, ASME, Miami, USA, 1985.
[4] LI Gensheng, SHEN Zhonghou, ZHOU Changshan, et al. Investigation and application of self-resonating cavitating water jet in petroleum engineering[J]. Petroleum Science and Technology, 2005, 23(1): 1-15.
[5] 易灿, 李根生, 张定国. 围压下自振喷嘴空化起始能力试验及应用研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 218-223.
YI Can, LI Gensheng, ZHANG Dingguo. Laboratory and field study of enhancing cavitating effect with self-resonating nozzle under ambient pressure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 218-223.
[6] 马飞, 蔡腾飞, 柳靖, 等. 自振射流频率特性的试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 182-187.
MA Fei, CAI Tengfei, LIU Jing, et al. Experimental study of self-resonating waterjet frequency characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 182-187.
[7] 李登, 李晓红, 康勇, 等. 风琴管喷嘴内表面粗糙度对高压射流特性的影响试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 169-176.
LI Deng, LI Xiaohong, KANG Yong, et al. Experimental investigation on the influence of internal surface roughness of organ pipe nozzle on the characteristics of high pressure jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 169-176.
[8] LI Deng, KANG Yong, DING Xiaolong, et al. Effects of area discontinuity at nozzle inlet on the characteristics of self-resonating cavitating waterjet[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 813-824.
[9] JOHNSON V E, CHAHINE G L, LINDENMUTH W T, et al. The development of structured cavitating jets for deep hole bits[C]// Fall Technical Conf. & Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, spe11060. 1982.
[10] 孙宝江, 王汝元, 沈忠厚. 一种新型自振脉冲喷嘴的设计[J]. 石油大学学报, 1994, 18(3): 31-34.
SUN Baojiang, WANG Ruyuan, SHEN Zhonghou. Design of a new type of self-resonating pulsating nozzle[J]. Journal of China University of Petroleum, 1994, 18(3): 31-34.
[11] 汪朝晖, 胡亚男, 廖振方, 等. 基于自激振荡脉冲效应的雾化喷嘴出口流道空化特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 204-212.

- WANG Zhaohui, HU Yanan, LIAO Zhenfang, et al. Cavitation characteristic study on the outlet channel of atomization nozzle based on the self-excited oscillating pulse effects[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(14): 204-212.
- [12] KIM K H, CHAHINE G, FRANC J P, et al. Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction[M]. Netherlands: Springer, 2014.
- [13] FERRARI A. Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems[J]. *Proc. Math Phys.Eng.Sci.*, 2017, 473(2199): 20160345.
- [14] NAUDASCHER E, WANG Y. Flow-induced vibrations of prismatic bodies and grids of prisms[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 1993, 7(4): 341-373.
- [15] CHOI J K, HSIAO C T, CHAHINE G L. Numerical study of the cavitating jet and its erosivity[C]// WJTA-IMCA Conference and Exposition. November 2-4, 2015, New Orleans, Louisiana.
- [16] CHAHINE G L, COURBIERE P. Noise and erosion of self-resonating cavitating jets[C]// *Proceedings of the 8th Jet Cutting Technology Conference BHRA*. 1986: 167-176.
- [17] ADACHI Y, SOYAMA H, YAMAUCHI Y, et al. Jet structure analyses on high-speed submerged water jets through cavitation noises[J]. *Bulletin of the JSME*, 2008, 39(3): 568-574.
- [18] ZHANG Fenghua, LIU Haifeng, et al. Experimental investigation on noise of cavitation nozzle and its chaotic behaviour[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(4): 758-762.
- [19] 潘岩, 蔡腾飞, 马飞, 等. 围压条件下风琴管射流自激频率的估算模型[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(18): 220-225.
- PAN Yan, CAI Tengfei, MA Fei, et al. Self-excited frequency estimation model of organ-pipe waterjet under confining pressure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(18): 220-225.
- [20] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴的设计原理[J]. *石油大学学报*, 1992, 16(5): 35-39.
- LI Gensheng, SHEN Zhonghou. Design principle of organ-pipe cavitating jet nozzles[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 1992, 16(5): 35-39.
- [21] PETERSEN R A, CLOUGH R C. The influence of higher harmonics on vortex pairing in an axisymmetric mixing layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 239: 81-98.
-
- 作者简介: 蔡腾飞, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为自激振荡射流技术与应用。
E-mail: caitengfei92@163.com
- 潘岩, 女, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为自激振荡射流理论与应用。
E-mail: 18810636420@163.com
- 马飞(通信作者), 1968 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为振动噪声分析与控制、自振射流技术及应用。
E-mail: yeke@ustb.edu.cn