

空化射流空化云形态变化规律和流场稳定性研究

谭雅文¹, 张逸群¹, 于超¹, 田守增^{1*}, 熊浩¹, 彭可文^{1,2}, 王菲¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 东莞理工学院广东省分布式能源系统重点实验室, 东莞 523808

* 通信作者, tscsydx@163.com

收稿日期: 2020-10-14

国家自然科学基金(41961144026)、国家重点研发(2018YFA0702402)和油气资源与探测国家重点实验室开放课题基金(PRP/open-1905)联合资助

摘要 高压水射流具有强力的冲蚀能力, 在钻井工程中取得了良好的应用效果, 而射流过程中会发生空化现象, 该现象伴随着高温高压, 是影响射流冲蚀能力的关键因素之一。喷嘴的结构对射流的空化发生能力有很大影响, 分析空化射流流场特性和喷嘴结构之间的关系, 是高压水射流射流研究的一个重要内容。本文采取可视化实验方案, 用3D打印的风琴管式自振空化射流喷嘴, 通过高速摄影技术, 捕获喷嘴出口处空化射流流场特征, 尤其是流场中空泡云的形态变化。并采取图像处理, 分析了喷嘴结构改变对空化发生能力的影响。我们利用本征正交分解方法(POD)求取了流场结构的时均特征。通过对比不同喷嘴结构和射流水力参数下时均特征变化, 分析了自振空化射流流场结构的稳定性差异。研究结果发现, 喷嘴结构中谐振腔是影响空化发生能力的主要结构。在一定范围内增大谐振腔长度和直径有利于增强喷嘴的空化发生能力, 并提高喷嘴出口流场结构稳定性。但谐振腔长度和直径过大会影响喷嘴自振效应, 使流体经过喷嘴时难以形成共振, 而使喷嘴空化发生能力骤降。喷嘴出口长度和扩展角在本文研究中最佳值分别为两倍出口直径和40°。研究结果表明, 可视化角度直观明显, 可以为其他优化方案提供验证和有力补充, 对自振空化喷嘴优化及空化射流流场特性研究具有重要意义。

关键词 空化射流; 自振空化喷嘴; 可视化; 本征正交分解(POD)

Evolution of the cavitation cloud and stability of flow fields in a cavitating jet

TAN Yawen¹, ZHANG Yiqun¹, YU Chao¹, TIAN Shouceng¹, XIONG Hao¹, PENG Kewen^{1,2}, WANG Fei¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China.

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Systems, Dongguan University of Technology, Dongguan 532808, China

Abstract High pressure water jets have strong erosion ability and have achieved excellent results in drilling engineering. Cavitation phenomena occur in the process of jetting, which is accompanied by high temperature and high pressure, and is one of the key factors affecting the erosion ability of jets. The structure of the nozzle has a significant influence on the cavitation ability of the jet. Analysis of the relationship between the flow field characteristics of the cavitation jet and the nozzle structure is an important aspect of the study of high pressure water jets. In this paper, we conducted visualization experiments and we 3D-printed organ-pipe self-resonant cavitating nozzles. The characteristics of the cavitation jet flow field at the nozzle outlet, especially the morphological changes of the cavitation cloud in the flow field were captured with high-speed photography. After image pro-

引用格式: 谭雅文, 张逸群, 于超, 田守增, 熊浩, 彭可文, 王菲. 空化射流空化云形态变化规律和流场稳定性研究. 石油科学通报, 2022, 01: 71-80
TAN Yawen, ZHANG Yiqun, YU Chao, TIAN Shouceng, XIONG Hao, PENG Kewen, WANG Fei. Evolution of the cavitation cloud and stability of flow fields in a cavitating jet. Petroleum Science Bulletin, 2022, 01: 71-80. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.007

cessing, the impact of nozzle structure changes on cavitation generation capacity was analyzed. We used the proper orthogonal decomposition (POD) method to obtain the time-averaged characteristics of the flow field structure. The results show that the resonator is an essential structure that affects cavitation. Increasing the length and diameter of the resonator within a certain range ensure the occurrence of cavitation and the structural stability of the flow field. However excessive size affects the self-resonance of the nozzle and makes it difficult to create resonance. In this paper, the optimal values of nozzle outlet diameter and extension angle are twice the outlet diameter and 40° , respectively. The stability difference of water jets were analyzed by comparing the time-averaged characteristics under different nozzle structures and jet hydraulic parameters. The results show that the resonant cavity in the nozzle structure is the main part affecting the cavitation generation ability. Increasing the length and diameter of the resonant cavity within a certain range is conducive to enhancing the cavitation generation ability of the nozzle and improving the structural stability of the flow field at the nozzle outlet. However, excessive length and diameter of the resonant cavity will affect the self-vibration effect of the nozzle, making it more difficult for the fluid to form resonance when passing through the nozzle, and making the cavitation ability of the nozzle drop sharply. In this paper, the optimal values of nozzle outlet diameter and extension angle are twice the outlet diameter and 40° , respectively. This research provides a better way to study optimization of self-resonant nozzles and cavitating-jet characteristics, which is intuitive and can be a validation for other approaches.

Keywords cavitation jet; self-resonant cavitating nozzle; visualization; Proper Orthogonal Decomposition(POD)

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.007

0 引言

空化作为一种水力现象,最早被人们发现在轮船螺旋桨冲蚀破坏^[1-2]现象中,已有一百多年历史,其本质属于相变^[3-4]。这一相变过程中产生的蒸汽泡一般经历初生、发展、溃灭。在溃灭过程会伴随着高温、高压、微射流、噪声、声致发光^[5]等现象,会对接触材料表面造成剧烈的冲蚀破坏。如堤坝^[6]、螺旋桨、船闸^[7]等高速水流经过或冲击的部位,都会遭到空化现象影响,带来了巨大的经济损失。与此同时,利用空化强力的破坏特性(尤其是高温、高压、高速微射流、机械脉动冲击等)可以进行破岩^[8-10]、清洗^[11-12]等作业,在石油钻井^[13-16]过程中有着广泛的应用,且显著提高了机械钻速。空化喷嘴产生空化射流是利用空化能量的重要方式^[17]。自振空化喷嘴空化能力强^[4,18],适用于井底围压环境,被广泛应用于钻井工程中。

喷嘴尺寸结构影响射流空化能力,空化射流具有周期波动的特性^[19],射流过程中可以观察到空化泡簇拥成云状,周期内空化云经历初生、发展、脱落和溃灭4个阶段^[20],在同一位置,不同时刻,对应的空化云形态是周期变化的,这种周期变化使射流冲蚀能力产生波动,研究射流过程流场结构稳定性,有助于我们从另一个角度评价空化射流能力。

在目前的研究中,空化射流实验普遍采用高泵压、大排量的实验方案,产生的空化现象剧烈,空化噪声明显,通过水听器^[21]等设备,研究空化噪声频谱特征,进而对空化效果进行评价。但这一方法,容

易受到环境噪声和射流泵在内的仪器设备的影响。通过高速摄影记录的射流图像,存在空化云剧烈,水中气泡混合干扰,喷嘴内部现象不可见的问题。而通过Fluent等软件进行模拟,一般选择以获得最小压强为目标函数展开,而空化泡发展、运移、脱离、溃灭过程难以考虑^[22],难以捕捉空化云形态变化规律,对此,部分学者把模拟角度放在涡结构改变上,采取大涡模拟的方式,而大涡模拟本质上是单相流动,忽略气相,更无法模拟相变,对空化泡产生,以及溃灭后反弹难以还原。

由此可见,通过室内射流实验,开展可视化研究,对充分认识和研究空化射流都具有重要意义。本文基于可视化实验研究空化射流,从射流流场中空化云形态变化及流场结构稳定性两个角度研究流场特性。前者聚焦流场中空化云初生—脱落—溃灭变化过程及其位置,这一规律影响空化射流冲蚀过程中最佳喷距和有效范围的确定,充分认识这一规律,有助于使空化现象作用于目标靶件,提高射流冲蚀能力;后者聚焦射流过程不同流场结构实际贡献,从能量和时间平均角度对流场特性进行解释,明晰射流能量在射流过程中的分布,从流场结构稳定性和不同流场状态下的能量占比角度优化喷嘴,有助于提高射流冲蚀效率。喷嘴按现场使用的风琴管式自振空化喷嘴设计,使用相同的Strouhal数,几何结构相似,由流体力学相似理论可知,本研究中流动特征在一定程度上可以反应现场规律。

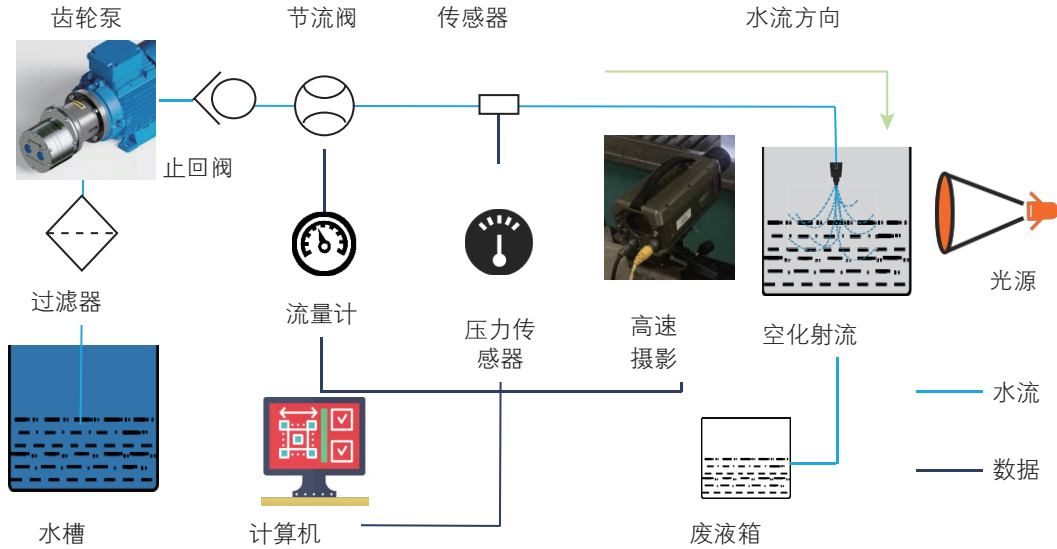


图 1 实验设备
Fig. 1 Experimental setup

1 自振空化射流可视化实验

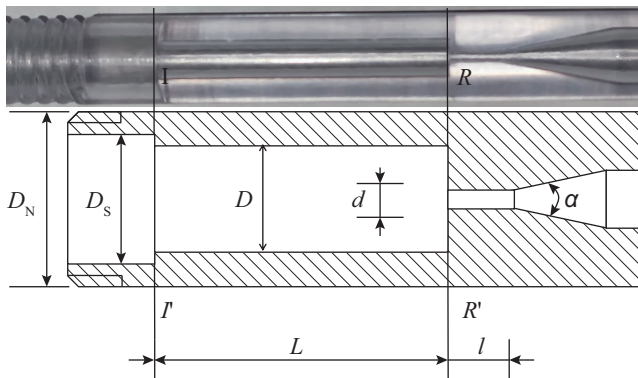
空化射流实验装置主要包括：磁力齿轮泵、节流阀、压力传感器、流量计、温度传感器、高速摄影、聚光灯、水箱、电脑等。图 1 是整套实验装置的示意图。磁力齿轮泵为 JONSON-MRB 型，高速摄影为 Phantom V310 型。管线由储水箱经滤网过滤，通过磁力齿轮泵、节流阀、压力传感器到自振空化喷嘴，射流后的废液经管线储集到废液桶里，聚光灯与高速摄影机在同一轴线，针对空化喷嘴，节流阀测得的信息显示在流量计上，压力传感器的数值显示在压力表上，流量计、压力表以及高速摄影机记录的数据由

数据线传输到计算机上储存，并做关联处理。

实验水力参数设置，泵压 4 MPa，排量范围在 3.4 L/min~ 4.8 L/min，这一排量范围对应空化初生最小排量，和空化云超出拍摄视野范围的最大排量，射流用水为室温条件下自来水，高速摄影帧速 20000 FPS，分辨率 256 pix × 256 pix。

本文中自振空化喷嘴结构采用风琴管式，以喷嘴出口直径 1.5 mm，泵排量 4 L/min，泵压 4 MPa 为基准，按照共振原则，设计基准喷嘴，喷嘴结构如图 2，分别研究谐振腔直径 D 、长度 L 、出口长度 l 、出口角度 α 变化带来的影响。

喷嘴结构参数设计按临界 Strouhal 数原则^[18,23-24]设计，主要参数设计遵循公式 (1)、(2) 和 (3)。



D_N -喷嘴外径； D_s -入口直径； D -谐振腔直径； d -出口直径； α -出口扩展角； L -谐振腔长度； l -出口长度； $I-I'$ -入口反馈面； $R-R'$ 谐振腔反馈面； $I-I'$ -入口反馈面

图 2 喷嘴结构示意图
Fig. 2 Nozzle geometry

$$L = \frac{K_N d}{M_a S_d} \quad (1)$$

$$K_N = \begin{cases} \frac{2N-1}{4}, \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \geq 1, \left(\frac{D}{d}\right)^2 \geq 1 \\ \frac{N}{2}, \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \geq 1, \left(\frac{D}{d}\right)^2 \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$M_a = \frac{V}{a} \quad (3)$$

式中， K_N —谐振腔内振动的模数系数； N —谐振腔内振荡模数； M_a —射流马赫数，无因次； V —射流速度； a —声波在流体介质中的传播速度； S_d —临界 Strouhal 数，无因次，取 0.3 或 0.6；

按上述公式计算结果为基准，对喷嘴各结构设置对照组，各组与基准喷嘴形成对照，设计结果如表 1。

表1 自振空化喷嘴结构设计

Table 1 Structure design of self-resonant cavitation nozzles

编号	出口直径 d/mm	出口长度 l/mm	谐振腔直径 D/mm	谐振腔长度 L/mm	出口扩展角 $\alpha/^\circ$
1	1.5	6	4	32	25
2	1.5	1.5	4	32	25
3	1.5	3	4	32	25
4	1.5	9	4	32	25
5	1.5	6	2.5	32	25
6	1.5	6	5.5	32	25
7	1.5	6	7	32	25
8	1.5	6	4	16	25
9	1.5	6	4	24	25
10	1.5	6	4	40	25
11	1.5	6	4	32	10
12	1.5	6	4	32	40
13	1.5	6	4	32	55

2 实验数据处理

高速摄影在射流稳定后连续记录 2000 幅图像作为喷嘴在该排量下的数据。记录后的射流图像，需要提取空化云形态，主要借助 Matlab 对图像进行差分处理 (Frame Difference Method, FDM)。主要步骤为，射流图像与背景图像做差去除背景，差分图像灰度处理和二值化处理，使图像中空化云呈现白色，其余部分全部为黑色，得到空化云形态。为避免射流过程中水域里自然气泡移动对空化云形态分析带来影响，对图像进行降噪，然后进行开运算 (低通平滑滤波)，获得空化云形态主体，这一部分是造成空化冲蚀的主要部分，将空泡溃灭后造成的扰动滤掉，最后获得空化云图像。

2.1 流场中空化云特征处理

对空化云图像进行分析，统计空化云长度和体积信息。空化云长度决定空化云运移距离，是衡量射流能否形成有效冲蚀和设计喷距的主要参考因素，在这里定义为每张图像中白色范围 Y 坐标的极差；空化云



图3 空化云体积计算原理

Fig. 3 The calculation principle of cavitation cloud volume

体积反应空化强度，是影响冲蚀效果的重要参数，为方便计算，这里定义为整幅图片每行连续白色像素点区域平方和。

2.2 流场结构时均特征处理

本文主要通过本征正交分解实现流场结构时均特征求取。本征正交分解 (POD) 是一种大规模数据分析方法，被广泛应用于图像识别、信号处理、流场分析等领域。其基本原理是将原本结构复杂的数据通过降阶处理，而获得一组基于最小二乘法的最优正交基。降阶处理得到的基函数，通常称之为“模态”，模态具有能量特性，可以反映数据的时均特征，与空间信息相关，基函数之间，两两正交，互不干扰；基函数的系数，表示该阶模态权重，即能量占比，与时间信息相关，而系数之间没有关系。

对 FDM 处理后的 2000 幅图片进行本征正交分解 (POD)，求取流场各阶模态及其能量占比，由流场结构主要特征及能量占比变化分析其稳定性差异。

通过本征正交分解提取每组 2000 幅图片主要特征，计算该特征下流场结构能量占比 (时间占比)，并按照降序排列。能量占比越分散，说明该射流过程存在多种不同形态的主要结构，由于各结构在空间分布存在差异，不利于射流能量的利用，充分利用射流能量的难度也更大；反之，能量占比越集中，说明流场结构特征越明显，越简单，射流结构也更加稳定。

3 实验结果与讨论

3.1 流场中空化云形态周期变化规律

射流形成的空化云具有明显周期性，主要包括初生—发展—脱落—溃灭 4 个阶段，由于初生现象不明显，难以与空化发展(生长)进行区分，云空化周期也可以认为包括生长—脱落—溃灭 3 个过程^[23]，本研究中，可视化实验为了观察到空化云初生位置，将射流排量逐渐增大至空化初生。

图 4 给出了单一周期内空化云主要形态变化。从图中可以看出， $t=0 \mu\text{s}$ 时刻空化初生，初生位置 A 位于喷嘴出口扩展角过渡的位置，即边界层分离前缘^[3]，而非喷嘴中心，A 处红点为气泡核心，从分离位置处，产生微气泡，微气泡迅速生长(膨胀)，然后空化泡继续膨胀并相互作用融合，至 $t=350 \mu\text{s}$ 形成泡状凸起，与水翼空化现象类似，凸起迅速向下位移并互相拥簇成云状。对空化云发展过程中的速度进行估计计算，以空泡云前缘为计算目标， $t=50\sim 150 \mu\text{s}$ 过程中空泡云前缘运移速度在 50 m/s 左右， $t=150\sim 350 \mu\text{s}$ 过程中速度降为 30 m/s 左右，主要由于喷嘴直径变化引起。空

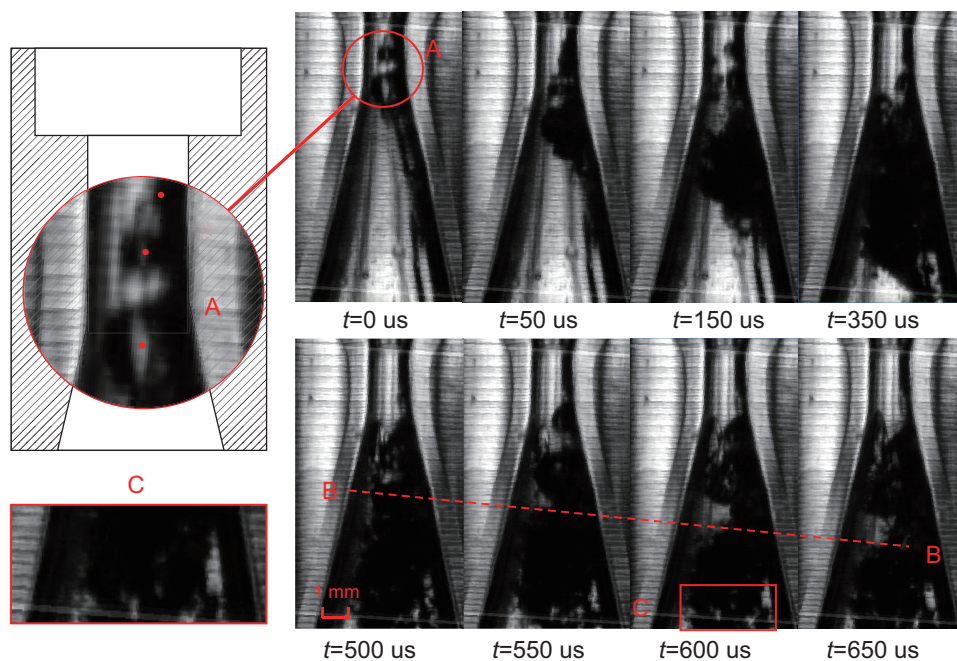


图 4 空化云形态

Fig. 4 The morphology of cavitation cloud

化云继续向下运移，至 $t=500 \mu\text{s}$ 时，在图中 B 处发现，空化云开始脱落，脱落位置逐渐下移，且更加明显，这一现象通常认为是脱落位置 B 处产生向上的反向射流，反向射流与主流撞击，造成空泡云的大尺度脱落^[24-26]。激波理论是对于空化云脱落现象的另一种解释，激波理论认为喷嘴出口空化云大量迅速溃灭而产生水汽激波，压力波向上传递到下一周期空化云前缘时，造成两个周期的空化云脱落^[27-28]，激波效应在流速较快，空化数较小时难以忽略^[23]。脱落后的空化云继续向下运移至 C 处，发生空泡云大量溃灭，并伴随着体积迅速减小，直至完全消失。

分析单周期内空化云长度和体积变化，图 5 所示，给出了射流过程中 3 个周期内空化云长度和体积变化。

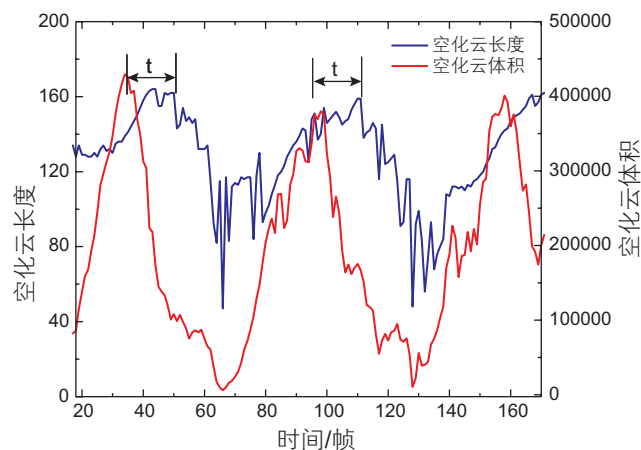


图 5 空泡云长度及体积变化曲线

Fig. 5 Length and volume curve of cavitation cloud

可以看出, 1)空化云长度和体积变化周期一致; 2)同一周期内, 两者变化存在时间差, 这与空化云脱落与空泡溃灭有关; 3)空化云体积在上升阶段, 会伴随着一次小幅下降, 与空泡脱落有关, 说明脱落过程会伴随着空泡的溃灭; 4)空化云长度在下降阶段会骤然减小, 这是因为周期末, 残余的空泡运移到远处突然溃灭所致。

3.2 喷嘴结构对流场中空化云影响规律

结合上述分析, 对不同喷嘴, 在不同排量下空化云差异进行比较, 为避免空化云周期变化影响, 用空化云长度和体积的平均值进行分析, 按每组记录的2000幅数据结果求取平均值, 然后按照各喷嘴结构尺寸变量进行讨论, 讨论结果如下。

(1) 谐振腔长度变化影响规律

图6中容易发现, 延长谐振腔长度, 空化云长度更长, 说明延长谐振腔长度有利于空化泡运移, 在排量为4.80 L/min时, $L=40$ mm喷嘴空化云长度较 $L=16$ mm喷嘴增长超过55%。而空化云体积变化一图中可以发现, 排量为4.80 L/min时, $L=32$ mm喷嘴空泡云体积最大。该实验以基准喷嘴展开, 其固有频率与射流激励频率相等, 过大或过小, 会影响喷嘴共振效果, 共振时, 喷嘴出口流场压力最低, 更易激发流体空化, 此时产生的空化云体积最大。由于可视化实验设计的喷嘴尺寸较小, 从喷嘴内流场结构可以看出, 流体经过入口反馈面时, 边缘撞击壁面压缩内部流体, 使进入谐振腔射流的速度梯度增大, 呈现中心加速,

边缘减速, 谐振腔长度较短时, 射流到达谐振腔反馈面前边缘流速慢, 难以形成较大的涡旋, 使核心射流层厚度大, 相对而言, 谐振腔反馈面节流效果减弱; 增大谐振腔长度, 可以有效减缓由于谐振腔前入口反馈面带来的影响, 出口断面形成大涡旋, 充分压缩射流核心段厚度, 形成较快的射流速度, 获得更长的空化云长度。

(2) 谐振腔直径变化影响规律

从图7可以看出, 空化云长度随谐振腔直径增大而增大, 排量大于3.7 L/min后 $D=7.0$ mm喷嘴空化云长度增幅更加明显, 排量在4.8 L/min时, 超过 $D=2.5$ mm喷嘴70%左右, 而空化云体积在 $D=4.0$ mm时获得最大值。考虑反馈面的影响, 增大谐振腔直径, 使来流撞击反馈面卷曲成更大的涡旋结构, 对称的反向涡旋压缩射流核心, 使之获得更大的流速, 核心流速增大, 空化更容易发生, 且运移更远, 但受反向涡旋的影响, 出口处射流能量整体减小, 获得的空化体积有所减小。

(3) 出口长度影响变化规律

从图8可以看出, 出口段有最佳长度, 为两倍出口直径。此时空化云长度和体积较其他喷嘴增幅在一倍左右。结合空化射流周期变化图4可知, 空化初生位置为出口扩展段前缘, 出口段过短, 射流由于惯性, 不能充分在这一位置实现边界层分离, 形成空化云; 当出口段过长时, 由于出口直径很小, 泵压低, 使出口段内射流能量迅速递减, 影响空化效果, 综上分析, 出口段长度应当有最佳值, 其他学者研究内容也有相

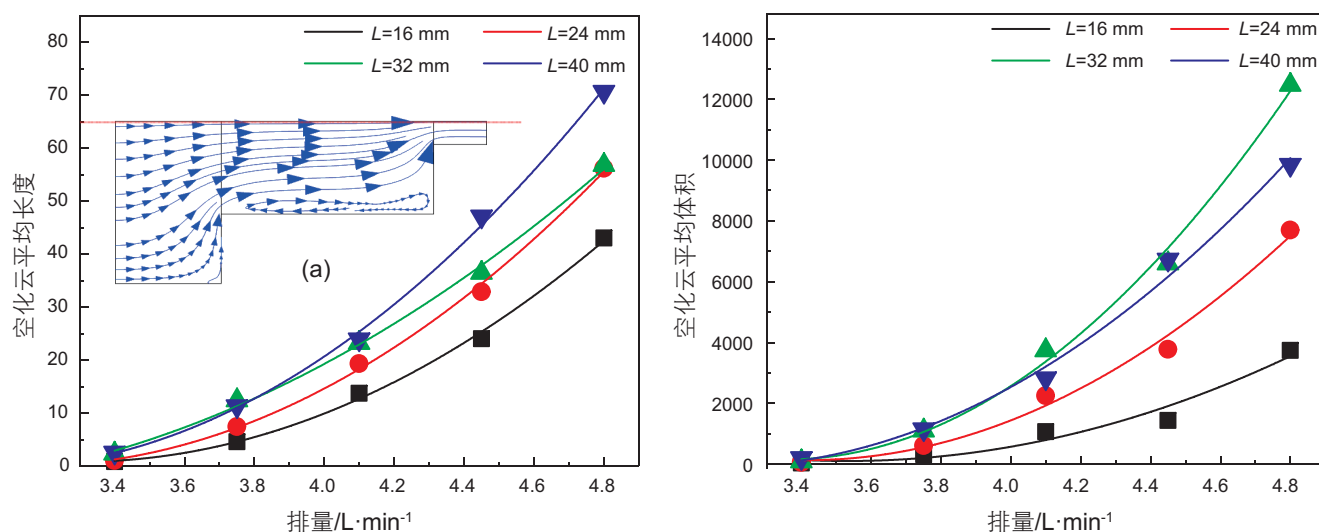


图6 不同排量下空化云平均体积随谐振腔直径变化 (a) 喷嘴内流场结构

Fig. 6 The length and volume of cavitation cloud varies with L under different displacement (a) flow field in nozzle

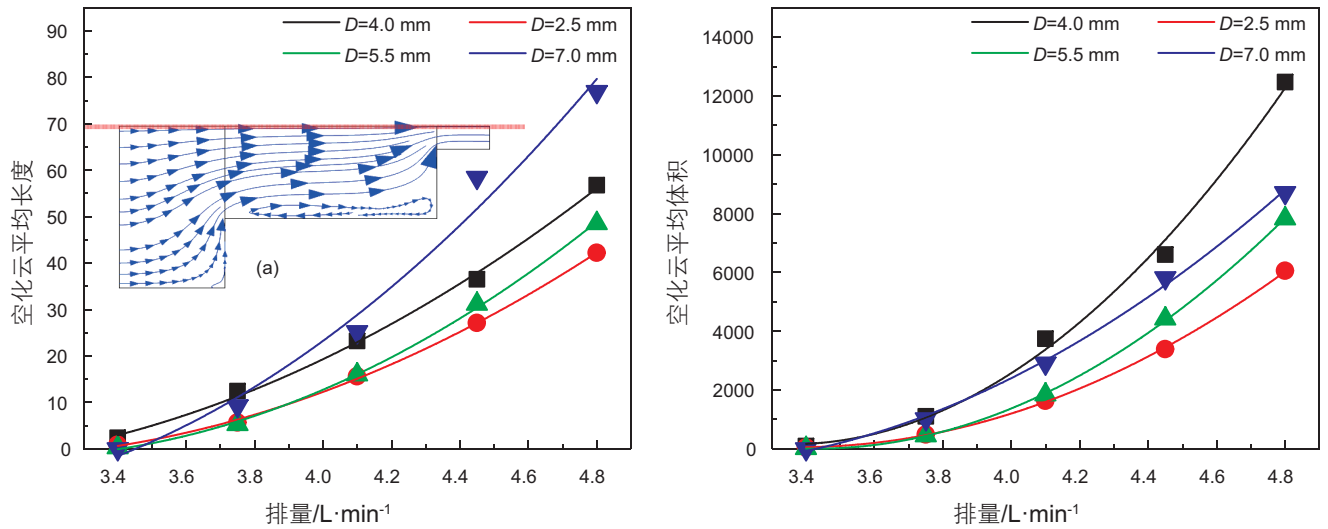


图 7 不同排量下空化云长度和体积随谐振腔直径变化 (a) 喷嘴内流场结构

Fig. 7 The length and volume of cavitation cloud varies with D under different displacement (a) flow field in nozzle

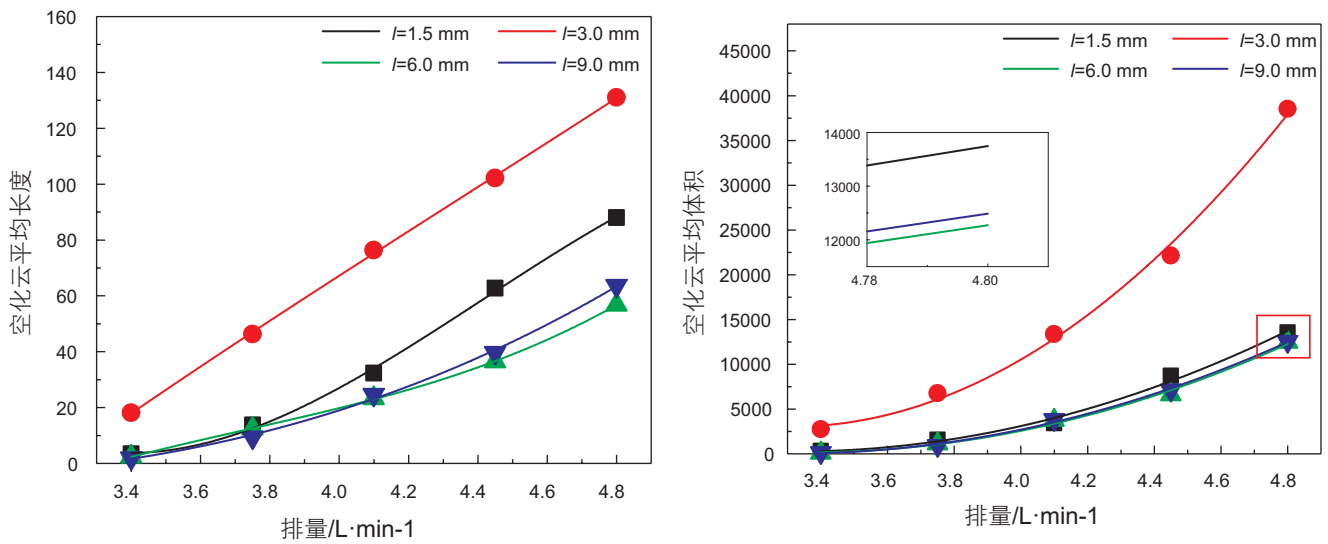


图 8 不同排量下空化云长度和体积随喉道长度变化

Fig. 8 The length and volume of cavitation cloud varies with l under different displacement

同发现，不过最佳长度有差异，彭可文^[29]等通过数模计算得到的最佳长度为 4 倍出口直径，这一差异与具体的出口直径和水力参数有关，排量较大时，最佳长度会趋于稳定。

(4) 扩展角变化影响规律

图 9 可以看出扩展角最佳值为 40° 。扩展角 $\alpha=40^\circ$ 时，空化云体积较其他喷嘴有明显增长，尤其是排量为 4.8 L/min 时，平均增幅超过 60%。因为扩展角主要影响边界层分离，角度越大，出口射流边界层分离越明显，而角度越大，该部分喷嘴直径变化越快，使射流速度下降越快，空化云运移速度下降也会越快，最

终空化云长度减短。从空化云体积差异可以看出， 40° 时，空化云发育最充分，而考虑到较小的扩展角对应段直径也较小，容易获得更大的射流速度，所以在 $\alpha=10^\circ$ 时，空泡运移较远，空化云长度较长。

3.3 流场结构稳定性分析

射流过程中，空化云周期波动，为获得流场结构时均特征，对射流图像进行 POD 处理。图 10 给出了处理后一阶模态、四阶模态、六阶模态和十阶模态图像，分析流场主要结构可以发现，低阶模态主要表现为单一旋向的大尺度涡，而随着模态阶数增加，大尺

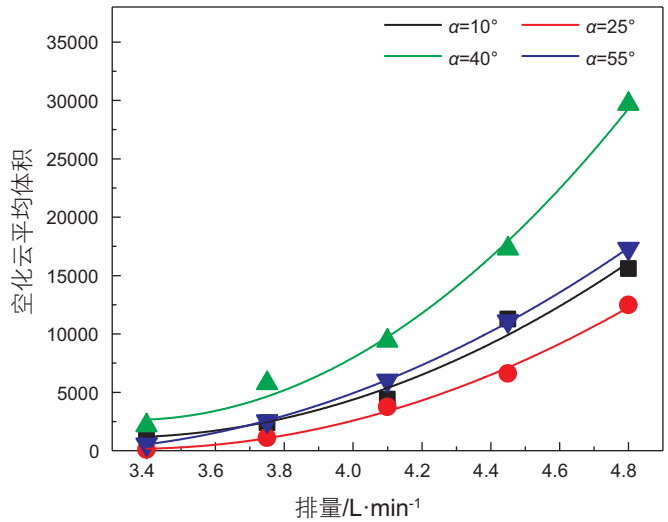
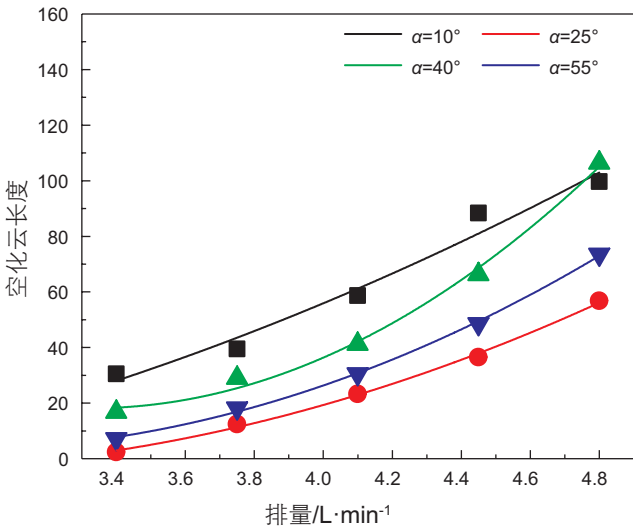


图 9 不同排量下空化云长度和体积随扩展角变化

Fig. 9 The length and volume of cavitation cloud varies with α under different displacement

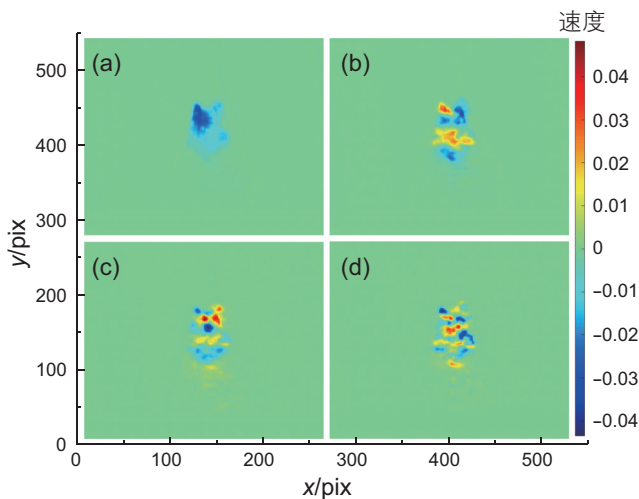
度涡分解为小的涡旋，呈现正反旋向低强度涡交替的状态。

分析其模态能量占比发现，如图 11，一阶模态占据绝大部分能量，随模态阶数增加，能量骤减，说明流场整体规律性强。本文以一阶模态为主，对比各喷嘴在不同排量状态下一阶模态能量占比，以此分析喷嘴结构对流场结构稳定性的影响。

表 2 给出了各喷嘴在不同排量下一阶模态能量占比，对比发现，谐振腔长度和直径变化，对一阶模态能量占比影响较大，从谐振腔长度变化带来的影响可以看出，喷嘴谐振腔长度为 $L=16\text{ mm}$ 时，以及 $L=24\text{ mm}$ 低排量时，一阶模态能量占比低，结合上一

小节中分析，谐振腔长度过短时，受入口反馈面影响加剧，流场结构稳定性差。从谐振腔直径变化带来的影响可以看出，直径 $D=7.0\text{ mm}$ 一阶模态能量占比小，此时反馈面收缩比例大，入流冲击造成的影响更明显，流场结构波动也更加明显，反馈面比例减小，类似于锥形喷嘴，射流过度平缓，周期脉动减弱，流场结构稳定性增强。

分析出口变化带来的影响，当出口长度 $l=3.0\text{ mm}$ 即两倍出口直径时，一阶模态能量占比高，射流结构稳定性好。出口扩展角度变化，最低能量占比为 74.63%，最高为 84.59%，相较于其他参数改变带来的影响很小，考虑空化初生位置在出口段扩展角前缘，而喷嘴压力最低位置在出口段中心，靠近反馈面处，



(a)一阶模态、(b)四阶模态、(c)六阶模态、(d)十阶模态

图 10 模态图像

Fig. 10 Modal images

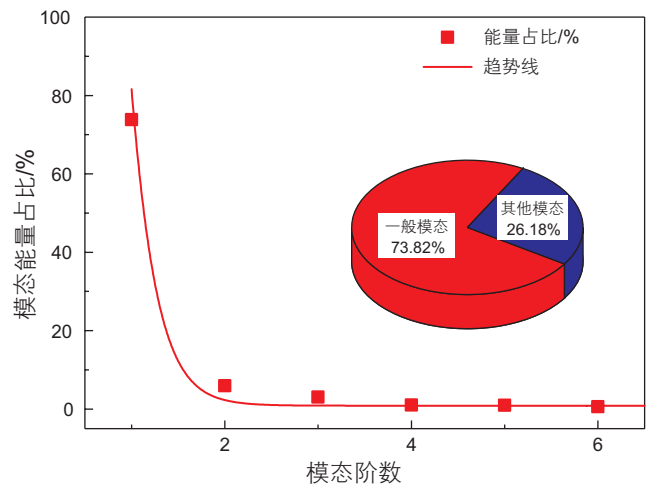


图 11 各阶模态能量占比

Fig. 11 Modal energy ratio of each order

表 2 各喷嘴在不同排量下一阶模态能量占比
Table 2 First-order modal energy ratio of nozzles with different displacement

尺寸特征值	一阶模态能量占比		
	4.8 L/min	4.45 L/min	4.1 L/min
$L=16$ mm	63.9 7%	62.1 1%	66.1 3%
$L=24$ mm	79.1 2%	70.7 8%	64.1 4%
$L=32$ mm	81.0 4%	76.8 1%	73.8 2%
$L=40$ mm	78.1 2%	74.3 6%	64.2 3%
$D=2.5$ mm	84.2 6%	73.9 1%	74.4 5%
$D=4.0$ mm	81.0 4%	76.8 1%	73.8 2%
$D=5.5$ mm	78.7 8%	76.3 2%	74.1 8%
$D=7.0$ mm	66.0 7%	56.8 0%	69.5 6%
$l=1.5$ mm	71.0 6%	72.0 1%	65.8 7%
$l=3.0$ mm	84.1 2%	81.0 0%	68.3 2%
$l=6.0$ mm	81.0 4%	76.8 1%	73.8 2%
$l=9.0$ mm	73.0 3%	75.9 5%	71.0 3%
$\alpha=10^\circ$	80.3 2%	80.5 8%	74.6 3%
$\alpha=25^\circ$	81.0 4%	76.8 1%	73.8 2%
$\alpha=40^\circ$	73.6 0%	81.3 3%	76.3 7%
$\alpha=55^\circ$	84.5 9%	78.0 6%	77.1 4%

说明在收缩断面处空化可能已经“初生”，而受限于拍摄设备的条件问题，或这种处于“激发态”的空化初生本身属于流体的某种“稳定状态”而不能被观察到，

直到流体运动到扩展角前缘，边界层分离，空化泡才迅速初生—发展—膨胀，所以该阶段空化云持续的时间占比接近，一阶模态能力占比差距也较小。

4 结论

本文基于可视化实验，从射流流场中空化云形态变化和流场结构稳定角度出发，研究了流场结构特性和喷嘴各部分之间的关系。本文形成的具体结论如下。

(1) 谐振腔长度影响射流空化能力和流场结构稳定性，适当延长有利于空泡运移。

(2) 谐振腔直径增大有利于增强喷嘴自振效果，提高空化初生和空泡运移能力，但直径过大会使射流核心区变薄，导致空化云体积减小，容易溃灭，影响冲蚀效果。

(3) 出口段长度有最佳值，本文实验结果为两倍出口直径，具体设计要考虑实际水力参数和喷嘴材料等因素，如材料摩阻系数等，可由实验确定。

(4) 出口扩展角对喷嘴出口流场稳定性影响较小，在本实验中最佳值为 40° 。

(5) 出口扩展段前缘为空化初生位置，但空化在谐振腔和谐振腔反馈面处已经“产生”，在扩展段前缘边界层处被“激发”，最终形成空泡云。

参考文献

- [1] CHAHINE G L, HSIAO C T, RAJU R. Scaling of cavitation bubble cloud dynamics on propellers[J]. Fluid Mechanics & Its Applications, 2014, 106: 345–373.
- [2] LINDAU J W, BOGER D A, MEDVITZ R B, et al. Propeller cavitation breakdown analysis[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(5): 617–9.
- [3] 潘森森, 彭晓星. 空化机理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. [PAN S S, PENG X X, Physical mechanism of cavitation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.]
- [4] 李根生, 沈忠厚. 自振空化射流理论与应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008. [LI G S, SHEN Z H. Theory and application of self-vibrating cavitation jet[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008.]
- [5] GAITAN, FELIPE D. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble[J]. J. acoust. soc. am, 1992, 91(6): 3166–3183.
- [6] 张云莲. 泄水建筑物的空蚀破坏和处理方法[J]. 腐蚀与防护, 2001, 08: 343–345. [ZHANG Y L. The cavitation damage of sluicing structure and the preventing methods[J]. Corrosion & Protection, 2001, 08: 343–345.]
- [7] 陈明, 宣国祥, 陈明栋. 船闸输水系统水动力学研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(01): 157–160+168. [CHEN M, XUAN G, CHEN M. Review of hydrodynamics of lock filling and emptying system[J], Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(01): 157–160+168.]
- [8] 李根生, 沈忠厚. 常压下淹没自振空化射流冲蚀岩石效果的试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1987, 3: 17–27. [LI G S, SHEN Z Z, Rock cutting effect with self-resonating cavitation jets under atmospheric pressure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1987, 3: 17–27.]
- [9] 毕刚, 李根生, 屈展, 等. 自进式旋转射流钻头破岩效果[J]. 石油学报, 2016, 37(05): 680–687. [BI G, LI G, QU Z, et al. Rock

- breaking efficiency of the self-propelled swirling jet bit[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(05): 680–687.]
- [10] 马东军, 李根生, 金磊, 等. 脉冲空化多孔喷嘴破岩效果试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(01): 83–87. [MA D, LI G, JIN L, et al. Experimental study of rock breaking efficiency by pulsed cavitating multi-hole nozzle[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2015, 39(01): 83–87.]
- [11] 武君, 张晓冬, 刘学武. 水力空化及应用[J]. 化学工业与工程, 2003, 20(6): 387–391. [WU J, ZHANG X, LIU X. Hydrodynamic cavitation and its applications[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2003, 20(6): 387–391.]
- [12] 沈晓明, 李根生, 马加计, 等. 油管结垢机理及水力清垢技术研究[J]. 石油钻探技术, 1996, 03: 44–46. [SHEN X, LI G, MA J, et al. Study on scaling mechanism and hydraulic cleaning technology of tubing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1996, 03: 44–46.]
- [13] 付加胜, 李根生, 史怀忠, 等. 水力脉冲空化射流钻井技术适应性分析[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(05): 10–14. [FU J S, LI G S, SHI H Z, et al. Analysis on adaptability of hydraulic pulse cavitating jet drilling technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(05): 10–14.]
- [14] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 239–243. [LI G S, SHI H Z, SHEN Z H, et al. Mechanisms and tests for hydraulic pulsed cavitating jet assisted drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(2): 239–243.]
- [15] 李根生, 沈忠厚. 空化射流及其在钻井工程中的应用研究[J]. 石油钻探技术, 1996, 024(4): 51–54. [LI G S, SHEN Z H. Investation and application of cavitating water jet in drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1996, 024(4): 51–54.]
- [16] 王学杰, 李根生, 康延军, 等. 利用水力脉冲空化射流复合钻井技术提高钻速[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 117–120. [WANG X J, LI G S, KANG Y J, et al. Improvement of penetration rate with hydraulic pulsating-cavitation jet compound drilling technology[J]. *Acta Petrolei Sinica* 2009, 30(1): 117–120.]
- [17] LUO X W, JI B, TSUJIMOTO Y. A review of cavitation in hydraulic machinery[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(3): 335–358.
- [18] 易灿, 李根生, 张定国. 喷嘴结构对空化起始影响的实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 019(001): 52–55, 60. [YI C, LI G S, ZHANG D G. Experimental study on cavitation inception of nozzles with different geometries[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 019(001): 52–55, 60.]
- [19] XIANG L, WEI X, CHEN S. Experimental study on the frequency characteristics of self-excited pulsed cavitation jet[J]. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*, 2020, 83: 66–72.
- [20] PENG G, YANG C, OGUMA Y, et al. Numerical analysis of cavitation cloud shedding in a submerged water jet[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2016, 28(6): 986–993.
- [21] 凌岑, 王建青, 祝锡晶. 水听器法测量功率超声振动珩磨空化声场分布[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(04): 23–28. [LING C, WANG J J, ZHU X J. The acoustic cavitation field distribution in power ultrasonic honing by hydrophone method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(04): 23–28.]
- [22] PENG K, TIAN S, LI G, et al. Cavitation in water jet under high ambient pressure conditions[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2017, 89: 9–18.
- [23] 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J]. 力学进展, 2019, 49(00): 428–479. [JI B, CHENG H Y, HUANG B, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49(00): 428–479.]
- [24] CALLENAERE M, FRANC J, MICHEL J, et al. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 444: 223–256.
- [25] KAWANAMI Y. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 236(4): 788–794.
- [26] WANG Y W, HUANG C G, DU T Z, et al. Shedding phenomenon of ventilated partial cavitation around an underwater projectile[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(1): 014601.
- [27] GANESH H, M KIHARJU S A, CECCIO S L. Bubbly shock propagation as a mechanism for sheet-to-cloud transition of partial cavities[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 37–78.
- [28] ARNDT R, WOSNIK M, QIN Q. Experimental and numerical investigation of large scale structures in cavitating wakes[C]// *Collection of Technical Papers – 36th AIAA Fluid Dynamics Conference*, 2006, 1
- [29] 彭可文. 围压下自振空化射流空化发生能力与冲蚀性能研究[D]. 中国石油大学(北京), 2018. [PENG K W. Cavitation inception and erosive potential for self-resonating cavitating jets under ambient pressure conditions[D]. *China University of Petroleum (Beijing)*, 2018.]