

淹没空化射流空泡云动态变化规律研究

彭焱, 李根生, 田守增*

中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, tscsydx@163.com

收稿日期: 2016-12-07

国家自然科学基金“深层高温高压油气井安全高效钻完井基础研究, U1562212”和中英研究与创新桥计划合作项目“地热智能井钻完井关键技术与优化设计平台, S2016G7261”联合资助

摘要 淹没空化射流具有很强的空化冲蚀能力, 在石油钻井、储层改造等方面有着广泛的应用, 空化射流中空泡云的动态变化与射流冲蚀过程密切相关。本文开展了高速摄影拍摄淹没空化射流实验, 利用图像差分法对空泡云动态规律进行了深入分析, 讨论了空泡云周期性脱落的机理, 并首次研究了变量类型(空泡云长度、面积、宽度、射流中心点灰度值、灰度均值)和取值位置对确定空泡云脱落频率的影响, 优化了确定空泡云脱落频率的方法。研究表明, 淹没空化射流中的空泡云具有明显的周期性, 一个周期主要包括产生—发展—脱落—溃灭4个阶段。空泡云周期性脱落与剪切层内涡的周期性脱落、喷嘴结构以及空泡云导致的喷嘴过流面积变化(“憋压效应”)有关。灰度均值是计算空泡云脱落频率的最佳变量, 只有在射流中游一定区域内才能得到一致稳定的脱落频率。本研究有助于加深对淹没空化射流中空泡云动态变化规律的认识, 为优化喷嘴结构建立基础。

关键词 淹没空化射流; 空泡云; 动态变化; 脱落频率; 高速摄影; FFT; FDM

0 引言

淹没空化射流已经在石油钻井提速^[1-2]、储层改造^[3]、盐穴造腔^[4]、清洗船体和海洋平台隔水管^[5]等方面得到了广泛的应用。除此之外, 空化射流还能用于矿山开采^[6]、污水处理^[7]、材料表面处理^[8]和爆炸物处理^[9]等。国内外对于淹没空化射流的研究主要采用冲蚀实验和可视化两种手段。冲蚀实验主要研究空化射流冲蚀能力和冲蚀破坏效果, 国外学者^[10-14]就相关参数(喷嘴结构、泵压、环境压力、喷射时间、喷距、空化数等)对空化射流冲蚀强度的影响进行了较为系统的研究。国内中国石油大学(北京)李根生等^[2, 15-16]和重庆大学卢义玉等^[17-18]分别对空化射流破岩的机理和规律等进行了研究。需要指出的是国外冲蚀靶件均

为金属合金而国内靶件多为岩石。即使实验条件有所差异, 国内外学者对于淹没空化射流冲蚀破坏效果及参数影响规律还是得出了比较一致的结论。

空化射流可视化研究侧重于空泡云的动态变化特征, 空泡云动态变化和空化射流冲蚀过程密切相关^[14, 19-21]。国外学者Ooi^[22]、Ran^[23]、Gopalan^[24]和Straka^[25]等人分别利用全息摄影、纹影摄影等静态摄影技术和PIV技术对影响淹没水射流空化初生的相关参数(比例尺、边界层厚度、压力波动、空化核分布等)进行了研究, 阐明了空化射流中空泡云初生的临界条件。采用高速摄影拍摄空化射流最早见于Chahine等人对于空化射流破岩钻井的研究中^[26], 他们观察到空化射流具有自振(self-resonate)和空泡云周期性脱落(shedding)的特点, 并且空泡云形状和脱落频率随空化

引用格式: 彭焱, 李根生, 田守增. 淹没空化射流空泡云动态变化规律研究. 石油科学通报, 2017, 02: 228-239

PENG Chi, LI Gensheng, TIAN Shouceng. Dynamics of cavitation cloud in submerged cavitation water jet. Petroleum Science Bulletin, 2017, 02: 228-239. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.021

数改变。空泡云脱落频率是表征空泡云动态变化规律的一个重要参数,空化作用的频率直接影响储层改造效果,当空化作用频率和储层固有频率一致时增产效果最好^[27]。Vijay^[28]和Soyama^[19, 29-30]等人随后证实泵压也会影响空泡云脱落频率, Soyama认为空化射流剪切层中的复杂压力梯度可能是造成空泡云周期性脱落的原因。Hutli等人^[31-32]和Wright等人^[9]的研究结果也表明了类似的规律。值得注意的是在Wright等人的实验中,为了排除通常使用的高压柱塞泵泵压波动对空泡云的影响,采用了高压气体推动喷嘴内液体来产生高速射流。Sato及其合作者^[20, 21, 33-35]以及Watanabe等人^[14]利用高速摄影和FDM(Frame-Difference Method, 图像差分法)研究了空化射流中空泡云脱落的规律,他们认为空泡云周期性脱落的原因在于空泡云溃灭诱导产生的回射流(re-entrant jet), Yamauchi等人^[36]也支持该观点。Sato及其合作者还从垂直于射流方向上拍摄到了空泡云冲击固壁表面时在固壁表面扩散和溃灭的情形,成功解释了靶件上环形空蚀坑的成因。Sato等人^[34]和Peng等人^[37]的研究结果表明,空泡云频率谱中存在明显的低频部分(100 Hz以下),这是柱塞泵输出压力的低频周期性波动造成的,而空泡云脱落的固有频率(几百到几千Hz)不受柱塞泵压力波动频率的影响;柱塞泵压力波动还会影响空泡云的大小,在柱塞泵输出压力低的阶段空泡云长度和面积明显减小。国内目前还没有空化射流可视化的动态研究,仅限于拍摄静态照片以证明射流中存在空化现象^[38-39]。

已有研究在利用图像数据计算空泡云脱落频率时一般只采用某一位置处的一种变量^[9, 30, 31, 37, 40-42],没有

考虑变量类型和变量取值位置对确定空泡云脱落频率的影响。因此,我们利用高速摄影拍摄得到的淹没空化射流空泡云动态图像,首次研究了变量类型和变量取值位置对确定空泡云脱落频率的影响,优化了确定空泡云脱落频率的方法。准确地确定空泡云脱落频率,才能有针对性地优化喷嘴结构,使喷嘴产生和储层固有频率一致的空化射流。同时,我们利用FDM方法对空泡云图像进行了分析,加深了对空化射流空泡云动态特征的认识。

1 淹没空化射流可视化实验

1.1 实验装置

本文使用中国石油大学(北京)高压水射流钻完井实验室的高压水射流切割系统产生空化射流,在透明有机玻璃筒中实现淹没条件,实验装置如图1(a)所示。实验采用德国KMT公司超高压柱塞泵,实验条件下泵压为60 MPa,排量为1.21 L/min。喷嘴为带加长段的锥形喷嘴,该喷嘴本来是用于高压水切割的,但是也可以产生空化射流,这一点是受到Hutli等人的启发^[13, 31-32]。研究人员在空化射流实验中所用的喷嘴多种多样,除了自振喷嘴(风琴管、亥姆霍兹等)外,锥形喷嘴、角型喷嘴和圆柱形喷嘴都已被证明可以用于空化射流研究中(详情请参考本文涉及空化射流可视化的参考文献)。因为本文的主要目的是阐明空化射流中空泡云的动态特征,优化空泡云脱落频率的计算方法,因此对于喷嘴类型并没有特别的要求。该喷嘴喉

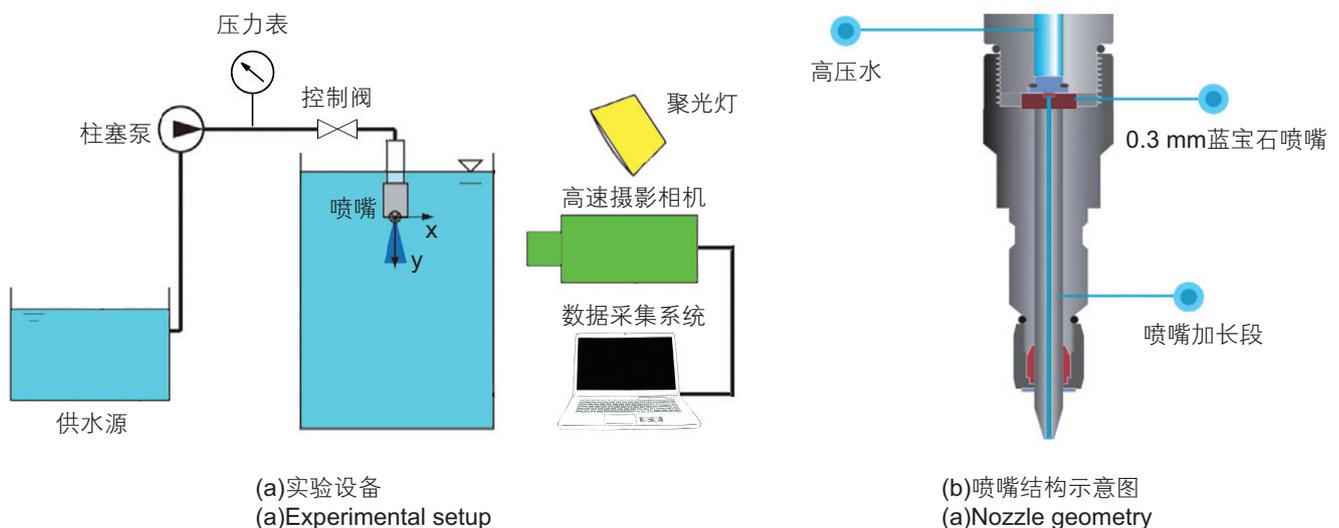


图1 实验装置

Fig. 1 Experiment apparatus

道直径 0.30 mm, 加长段直径 0.75 mm, 长 76.5 mm, 射流出口流速 285.30 m/s, 流量系数 0.82, 喷嘴结构如图 1(b)所示; 将喷嘴出口中心设置为坐标轴原点。高速摄影拍摄区域大小 128×208 pix, 拍摄频率 10 000 fps; 使用卤素聚光灯正面照明, 由于空泡云不透明、反光性较强, 其在照片中显示为白色; 实验中用水为普通自来水, 水温约为 6°C 。

1.2 实验数据处理

原始照片经由 MATLAB 编程处理, 转换为灰度图和黑白二值图; 在截去部分喷嘴和无关区域后, 图片的大小统一为 58×204 pix。FDM 方法处理图像的基本原理是用下一时刻的图像剪去前一时刻的图像, 从而得到这一小段时间间隔内空泡云的面积变化(产生/消失)^[14, 20, 21, 33, 35, 43]。如图 2 所示, a 图是由 0.1 ms 时刻的灰度图剪去 0 ms 时刻的灰度图得到的, 蓝色代表空化云消失, 红色代表空化云产生。

一般采用 FFT(快速傅里叶变换)计算空泡云脱落频率, 因此需要从图像中选择合适的时域变量。文献中采用的变量主要包括空泡云长度^[37, 40]、面积(水翼空泡云)^[41]、固定 y 值处的宽度^[31, 37]、灰度均值^[9]和 y 轴(射流中心线)上固定点处的灰度值^[30, 42], 各变量的意义如图 3 所示。已有研究中一般只采用一个位置处的一种变量做 FFT, 而在不同位置处采用不同类型的变量得到的主频率并不一定相同。因此本文选用了全部 5 种变量, 遍历了所有可能的取值位置, 探究了变量

类型和取值位置对确定空泡云脱落频率的影响。本文 FFT 采用的样本数为 1 000, 对应 0.1 s, 和 Wright 等人所采用的时间跨度相当^[9], 在 10 000 fps 的采样频率的频率分辨率为 10 Hz。减小样本数会使频率分辨率变差, 样本数为 500 时功率谱密度中相邻两个频率间隔 20 Hz, 不利于准确确定空泡云脱落特征频率; 另一方面, 增大样本数对于特征频率的影响不大, 在采用 2 000 的样本数时, 得到的特征频率与 1 000 样本数得到的频率之间的误差小于 1%, 但是计算量大大增加。综合考虑计算量和频率分辨精度的要求, 样本数取值确定为 1 000。

2 实验结果与讨论

2.1 空泡云单周期内动态变化

淹没空化射流产生的空泡云具有显著的周期性^[9, 20], 在一个周期内空泡云主要经过初生-发展-脱落-溃灭 4 个阶段, 图 4 展示了空泡云一个典型周期内的运动变化过程。可以看出, 0 ms 时新空泡云处于初生阶段, 分布在喷嘴出口不远处; 在射流下游, 脱落下来的上一周期空泡云已经进入溃灭阶段。从 0 ms 到 0.7 ms 空泡云处于发展阶段, 空泡云不断向下游移动, 长度、面积和宽度不断增加; 在空泡云发展阶段初期(0.3 ms 以前), 空泡云形状较为对称, 0.3 ms 之后由于两侧涡旋发育的差异^[36], 空泡云不对称性逐渐增

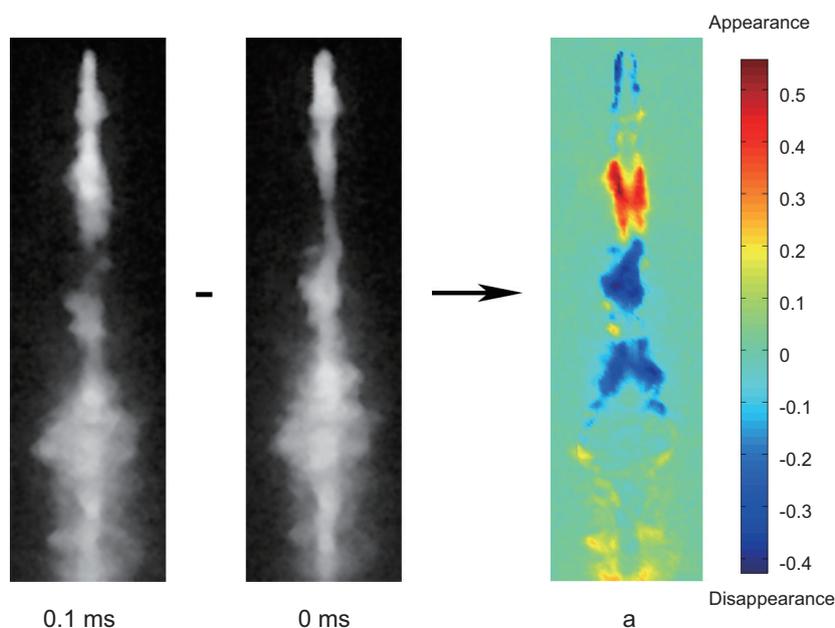


图 2 图像差分法

Fig. 2 Frame difference method

加。0.7 ms 后空泡云进入到溃灭阶段，面积不断减小；0.8 ms 时空泡云发生脱落，处于溃灭阶段的空泡云从

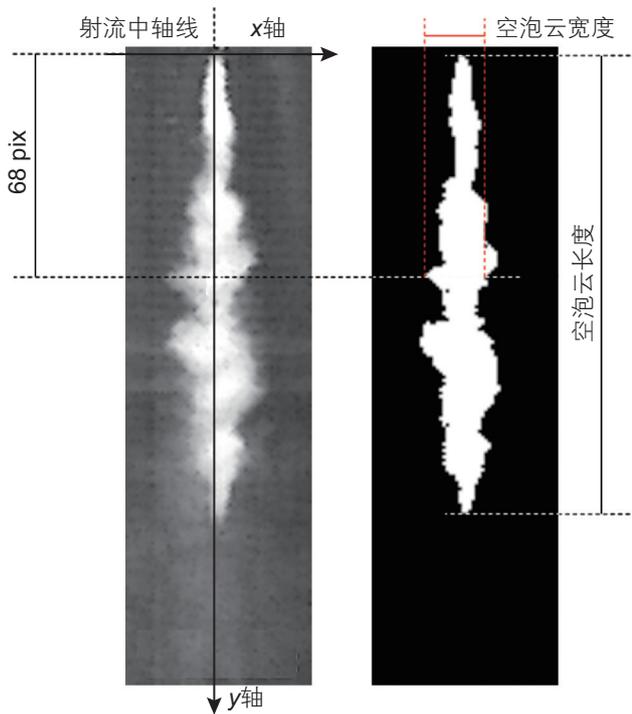


图 3 FFT 采用的变量
Fig. 3 Variables for FFT

新生空泡云上分离开来，分裂为若干小空泡云，最终完全溃灭(图中未显示)。从 0 ms 至 0.3 ms 的图像中还可以观察到上一个周期残留空泡云溃灭的最后阶段，1.1 ms 后的空泡云溃灭过程与此大致相同。图 4 中右图是同一过程的黑白二值图，从中能够更明显地识别空泡云的边界轮廓和形状变化，还可以得到空泡云长度、面积、前端速度和溃灭区域等信息，发展阶段空泡云前沿平均移动速度约为 82 m/s。

本实验中空泡云的一个周期(约 0.75 ms)长于单个空泡从产生到溃灭的响应时间，因此从微观角度来看，图中拍摄到的空泡在一个周期内可能经历了多次膨胀-收缩的过程，溃灭空泡产生的小空泡可以作为空化核，在遇到低压区时又迅速膨胀成为可见的空泡，剪切层内复杂的湍流压力波动(turbulent pressure)为此提供了条件；从宏观角度来看，空泡云大小的变化和射流剪切层平均压力的变化有关。

2.2 空泡云动态变化 FDM 分析

由于压力波动，高泵压阶段空泡云最大长度可能比低泵压阶段空泡云最大长度长 50% 以上。图 5(a)反映了高泵压阶段空泡云的动态变化规律，溃灭阶段空泡云有一小部分超过了拍摄范围，图 5(b)是对应的

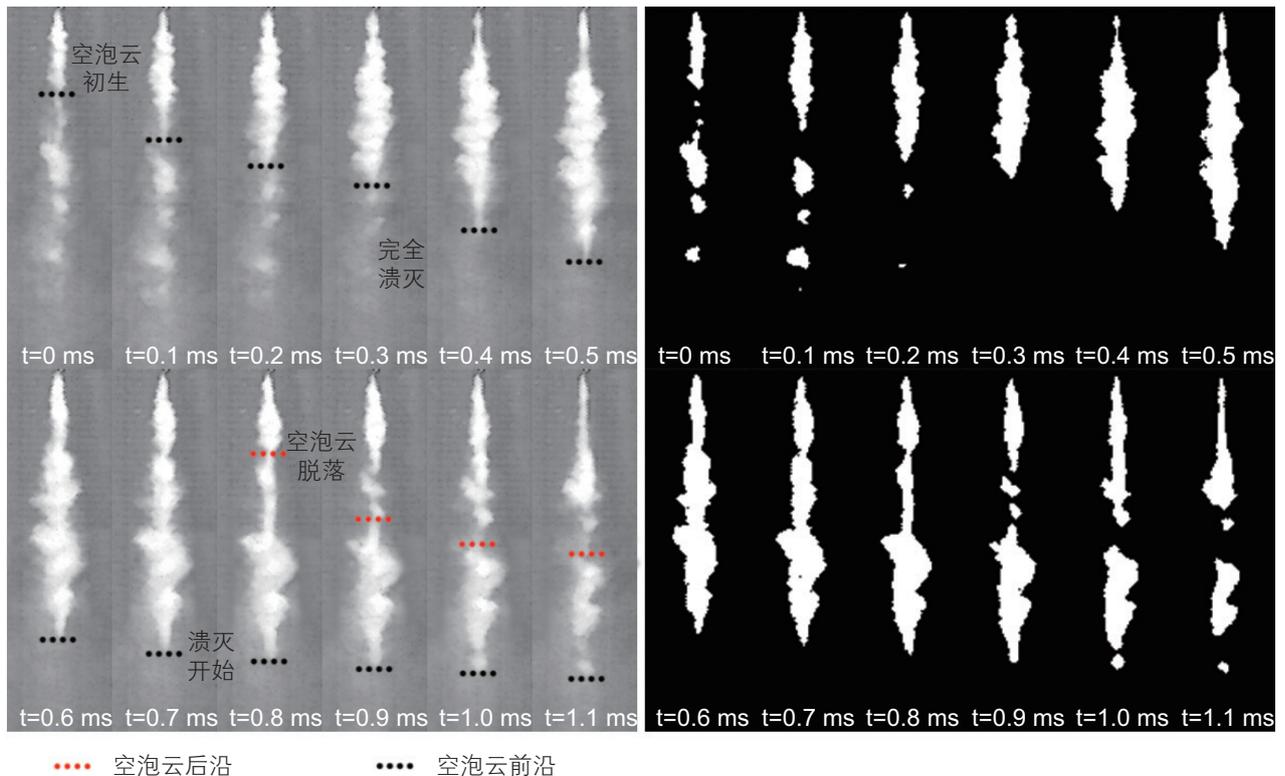
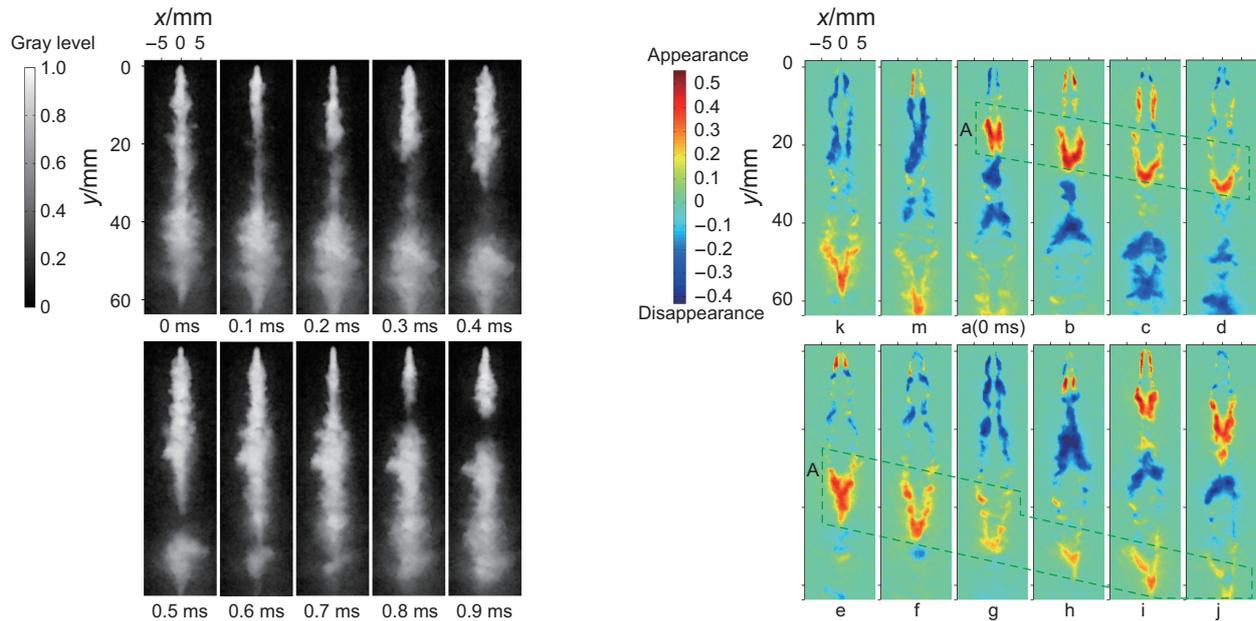


图 4 空泡云单周期内动态变化
Fig. 4 Dynamic change of cavitation cloud in a single cycle



(a) 高压阶段空泡云单周期内变化规律

(a) Cavitation clouds in one cycle during high pump pressure stage

(b) FDM图

(b) FDM images

图5 空泡云灰度图及 FDM 处理结果

Fig. 5 Gray images of cavitation cloud and FDM results

FDM图。除了空泡云溃灭会造成“消失”以外，有一部分“消失”其实是由空泡云向下游运移造成的(如f图中喷嘴出口附近的蓝色区域)，并不是真正代表空泡溃灭。由于压力变化，空泡云运移过程常常伴随着空泡发展(膨胀)和溃灭，因此在FDM图中并不能把运移和溃灭造成的消失很好地区分出来。

从图5(b)中可以看出，空泡在喷嘴附近的产生和消失主要集中在射流两侧剪切层中；而在射流下游空泡云的产生和消失主要集中在射流中心区域，这是因为射流剪切层压力波动减小，环境压力取代射流剪切层压力，在空泡云形态变化中起主要影响。k、m图反映了上一周期的空泡云逐渐向下游移动的过程(图5(a)中未给出)，k和m中蓝色区域主要是空泡云运移的结果，但是空泡云消失的面积大于产生的面积，由此可以判断空泡云已经进入溃灭阶段。0 ms旧空泡云脱落，新空泡云产生，此后新空泡云进入发展阶段并不断向下游运移(红色区域A)。旧空泡云从0.1 ms开始进入剧烈溃灭阶段，到0.4 ms几乎完全溃灭(b、c、d)，溃灭区域集中为 $y=40\sim 65$ mm的范围内。新空泡云从0.6 ms进入溃灭阶段(g图中空泡云消失大于产生)，并在0.8 ms脱落，其后的溃灭过程和b、c、d图十分类似。g、h、i图分别对应k、m、a图，其中的空泡云变化规律大致相同，体现了空泡云形态变化的周

期性。和灰度图相比，FDM图能够更直观地确定空泡云进入溃灭阶段(消失区域大于产生区域)的时刻、空泡云溃灭位置等信息，是对空泡云动态特征(图4)的有力补充。需要指出的是，空泡云的移动速度很快，0.1 ms内可以移动几个mm，在图像上十分明显，因此Watanabe等人^[14]做出的“相邻两幅灰度图之间时间间隔(0.1 ms)很小，从而可以忽略空泡运移”的假设是不合理的；并且他们只考虑了空泡的消失，忽略了空泡云产生，本文的结果更为合理。

2.3 淹没空化射流空泡云周期性脱落机理

虽然淹没空化射流中空泡云周期性产生和脱落的现象早已被人们所知，但造成这一现象的原因却仍然不清楚，相关文献对此也少有提及。一般认为，喷嘴喉道是整个流场中压力最低的地方，空化最先在喉道处产生^[35, 44]，而射流剪切层涡中心的低压区为空泡的发展提供了条件^[16]。Soyama等人^[19, 29, 40]认为空化射流剪切层中的复杂压力梯度可能是造成空泡云周期性脱落的原因，但并未考虑压力场和空泡相互耦合作用的影响。虽然淹没水射流剪切层中涡的形成与运移也有明显的周期性^[16]而且空化气泡和涡之间关系紧密，但是单纯用涡脱落频率来解释空化云脱落频率是不合理的。一旦产生了空泡，淹没射流就由单相流变为了多

相流，空泡的存在会对压力场、速度场造成影响，从而反过来影响剪切层中涡的产生和脱落。有学者利用数值模拟方法成功的模拟了水翼空化中空泡云周期性脱落过程，结果与实验现象符合得很好^[45-46]，但是数值模拟空化射流的尝试却不是很成功^[47-48]，结果和实验现象相差很大。这是因为空化射流在脱离喷嘴后属于自由流动，模拟难度比水翼空化要高得多，现有的湍流模型和空化模型还不能准确地模拟空化射流中空泡云的瞬态变化。

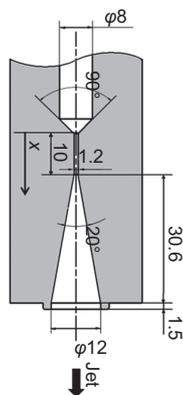
另一方面，Sato 及其合作者^[20, 21, 33-35]，Watanabe 等人^[14]以及 Yamauchi 等人^[36]认为空泡云周期性脱落的原因在于周期性的回射流，即流体从喷嘴外部向内部的回流。空泡云在射流下游高压区破裂时产生压力波，压力波诱导产生回射流，回射流返回到喷嘴出口引起空泡云脱落，这非常类似于水翼空化中空泡云脱落的机理^[45-46]。不过，回射流只存在于喉道出口有扩散段的角型喷嘴(图 6(a))中，而在其他类型的喷嘴中很难有显著回射流的形成。在角型喷嘴中，由于扩散段静压力大于喉道静压力(图 6(b))，数值模拟条件：速度入口 35 m/s，压力出口 1 atm)，扩散段壁面附近的流体有逆着射流方向向上游运动的趋势，从而产生了回射流；而在没有扩散段的喷嘴如锥形喷嘴中，相同条件下喷嘴喉道的静压力等于环境压力，没有形成回射流的条件。考虑到几乎所有类型的喷嘴都能在淹没高速状态下产生周期脱落的空泡云，回射流引起空泡云周期性脱落的解释有很大的局限性。我们认为，淹没状态下空化射流与环境流体之间的卷吸作用导致了剪切层中涡旋的形成(卷吸作用形成的“回射流”和 Sato 等人在实验中拍摄到的“回射流”有本质上的区

别，前者在时间和空间尺度上都较小(喷嘴附近)，而后者由显著的压力梯度造成，十分明显)，空泡云周期性脱落除了和剪切层涡的周期性脱落以及喷嘴内部结构有关外，可能还和空泡云出现导致的喷嘴过流面积变化有关。根据伯努利原理，高速射流造成喷嘴喉道压力降低，空泡最先在喉道内产生。气相空泡云的存在减小了喉道的过流面积，短时间内造成喷嘴上游一定区域内“憋压”，从而使得喉道内液体流速进一步增加，携带大部分空泡迅速喷出喷嘴，由于涡旋的作用在射流剪切层中膨胀、发展，而在喉道内又重新形成下一周期的空泡，由此产生了空泡云的周期性变化；由于“憋压”程度、喉道内残留空泡(空化核)体积等参数存在一定的随机性，空泡云大小的变化除了与泵压变化有关外还可能与这些参数的随机变化有关。

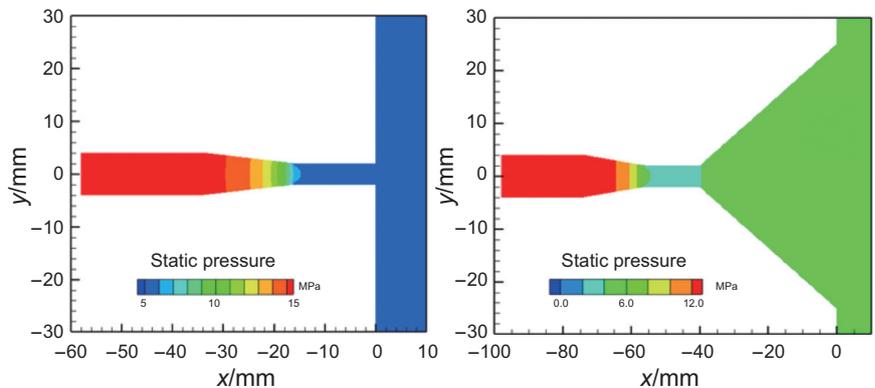
2.4 变量类型对空泡云脱落频谱的影响

空泡云长度和面积与位置无关，空泡云宽度、灰度均值和射流中心点灰度在 $y=68$ pix 处取值。图 7 给出了灰度均值信号在时域内的变化与对应的功率谱密度，可以看出，空泡云脱落的主频率为 1 350 Hz。和 Wright 等人的结果相比(图 8)，图 7(b)中主频率能量分布更加集中，100 Hz 以下的低频噪声不强，没有明显的高频噪声，这说明本文对于图像信号的处理更加合理。

我们将灰度均值功率谱作为参考基准，对比分析了其他四个参数的功率谱(图 9)。总的来看，长度和宽度功率谱的主频率和其他三个变量的主频率不一致，因此认为空泡云长度和面积不能作为衡量空泡云脱落频率的参数。长度功率谱(图 9(a))的主频率为



(a)带收缩-扩散段的角型喷嘴^[43]
(a)Horn nozzle with convergent-divergent section



(b)锥形喷嘴和角型喷嘴的压力云图
(b)Pressure contours of cone and horn nozzles

图 6 角型喷嘴及喷嘴压力场

Fig. 6 Horn nozzle and pressure contours of cone and horn nozzle

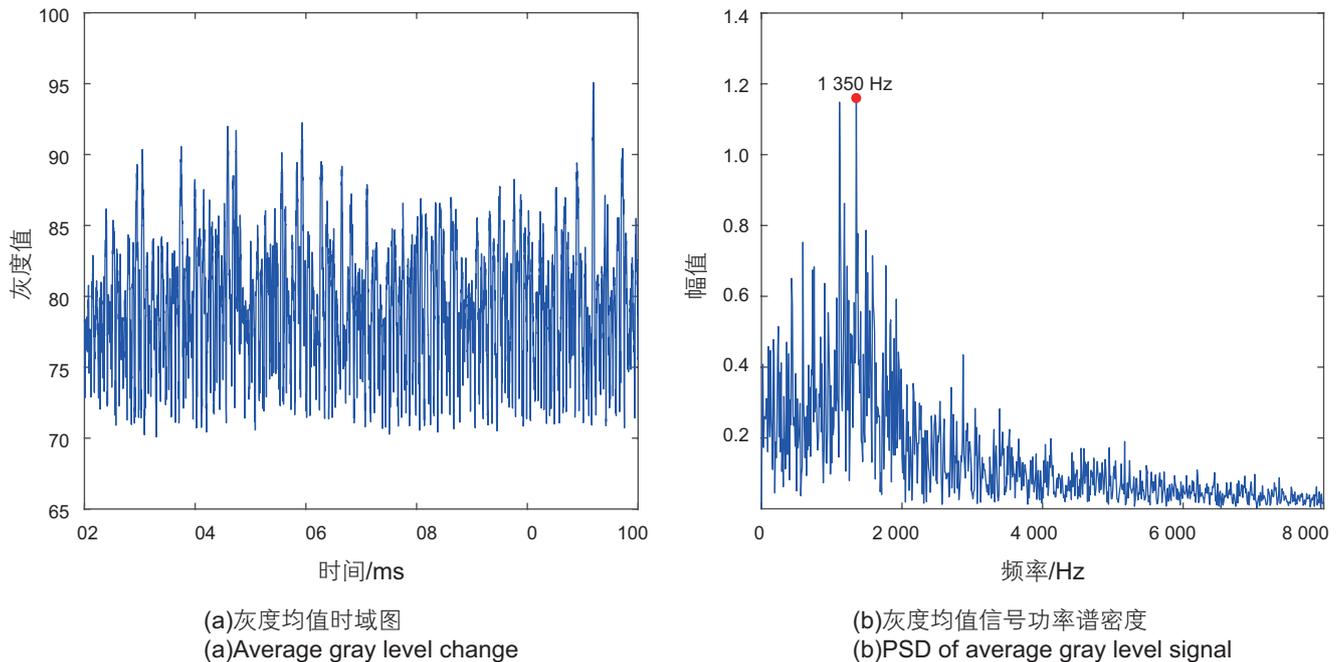
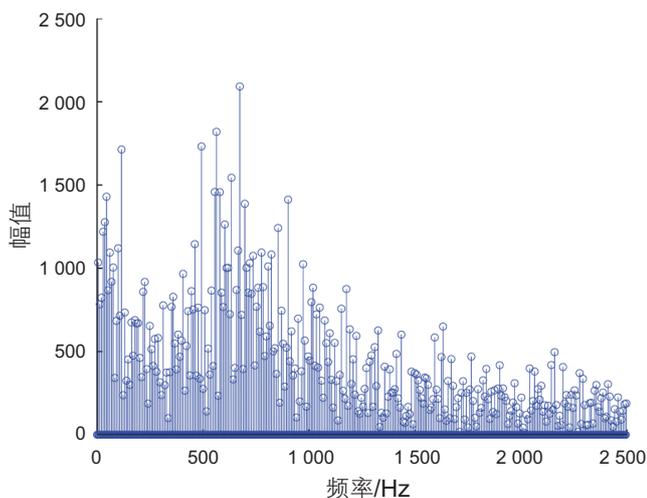


图7 灰度均值信号时域图与功率谱密度

Fig. 7 Average gray level change and its PSD

图8 灰度均值信号功率谱密度^[9]Fig. 8 PSD of average gray level^[9]

940 Hz, 各频率能量分布分散, 低频和低频噪声增多; 噪声的来源主要有两个, 其一是泵压波动导致的长度波动, 由此引入了低频噪声^[34, 37]; 其二是从黑白图中编程求取长度时由于程序缺陷引入的误差(Wright等人^[9]利用Photoshop手动从每幅图中确定空泡云长度, 这种方法对于本文中上千的样本数来说是不可行的)。面积功率谱(图9(b))中高频噪声不突出, 但主频仅为10 Hz, 低频噪声非常明显, 整体能量向低频部分偏移; 由于采样时间只有0.1 s, 幅值最高的10 Hz不可

能是真正的主频。面积功率谱噪声来自于泵压波动造成的空泡云面积波动和程序缺陷, 现有程序只能求得黑白图中所有白色区域的面积, 而一幅图中常常包括多个周期的空泡云(新生/未溃灭), 因此程序算出的空泡云面积总是大于实际的空泡云面积, 面积波动更加平缓, 算出的频率整体偏低。另一方面, 射流中心点灰度和空泡云宽度功率谱的主频率与灰度均值主频率相同, 曲线趋势一致(图9(c)、(d)), 可以作为确定脱落频率的参考。射流中心点灰度变化能在一定程度上反映整个宽度上灰度值的变化; 而空泡云宽度和灰度均值存在正相关的关系: 空泡云宽度越宽, 灰度均值越大。因此在确定空泡云脱落频率时, 空泡云宽度、射流中心点灰度和灰度均值这三个变量在一定程度上是等价的。然而, 从射流中心点灰度到空泡云宽度再到灰度均值, 变量包含的信息量增加, 更不容易受到噪声的影响(能量向主频率集中); 从信号稳定性的角度考虑, 灰度均值是最优的选择。

由以上分析我们可以得出结论: (1)由于泵压波动和程序缺陷, 空泡云长度和面积不能作为计算空泡云脱落频率的特征变量; (2)在采用空泡云宽度、射流中心点灰度和灰度均值做频谱分析时, 泵压波动对空泡云脱落主频没有显著影响; (3)三种变量具有一定的等价性, 灰度均值是最优的FFT变量。

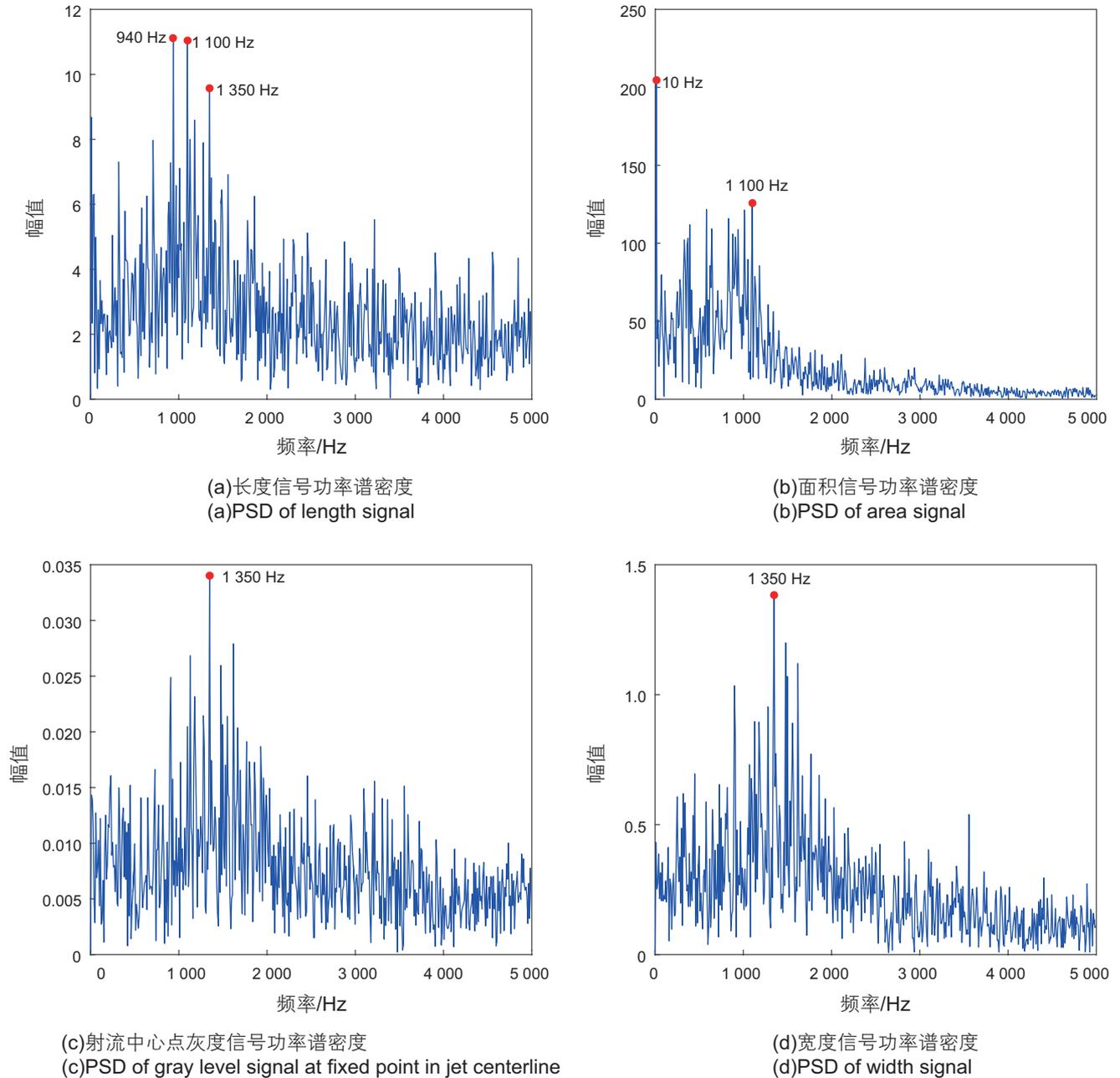


图9 不同变量的功率谱密度

Fig. 9 PSDs of different variables

2.5 变量取值位置对FFT结果的影响

图10中给出了不同 y 处得到的射流中心点灰度、宽度和灰度均值主频,图10(a)是滤掉了100 Hz以下频率的结果,图10(b)是原始结果。可以看出,无论是否去掉低频主频,3种变量能够得到一致且恒定脱落频率(1350 Hz)的 y 范围为55~88 pix(17.6~28.16 mm,无因次喷距59~94),这一区域称为主频稳定区。以图10(b)中的灰度均值曲线为基准,0~27 pix和126 pix

以外的主频率都非常小(10 Hz),称为主频零值区;28~54 pix和89~125 pix是主频过渡区。通过对空泡云图像的观察,发现喷嘴附近主频零值区(0~27 pix)内空泡云发展不充分,变化特征不明显;而射流下游主频零值区(126 pix以外)对应空泡云溃灭区域,环境压力起主要作用,不能反映空泡云本身的特征。主频稳定区内空泡云充分发展,并且空泡云的变化主要受射流剪切层压力影响,因此得到的主频率能够代表空泡云脱落的固有频率。

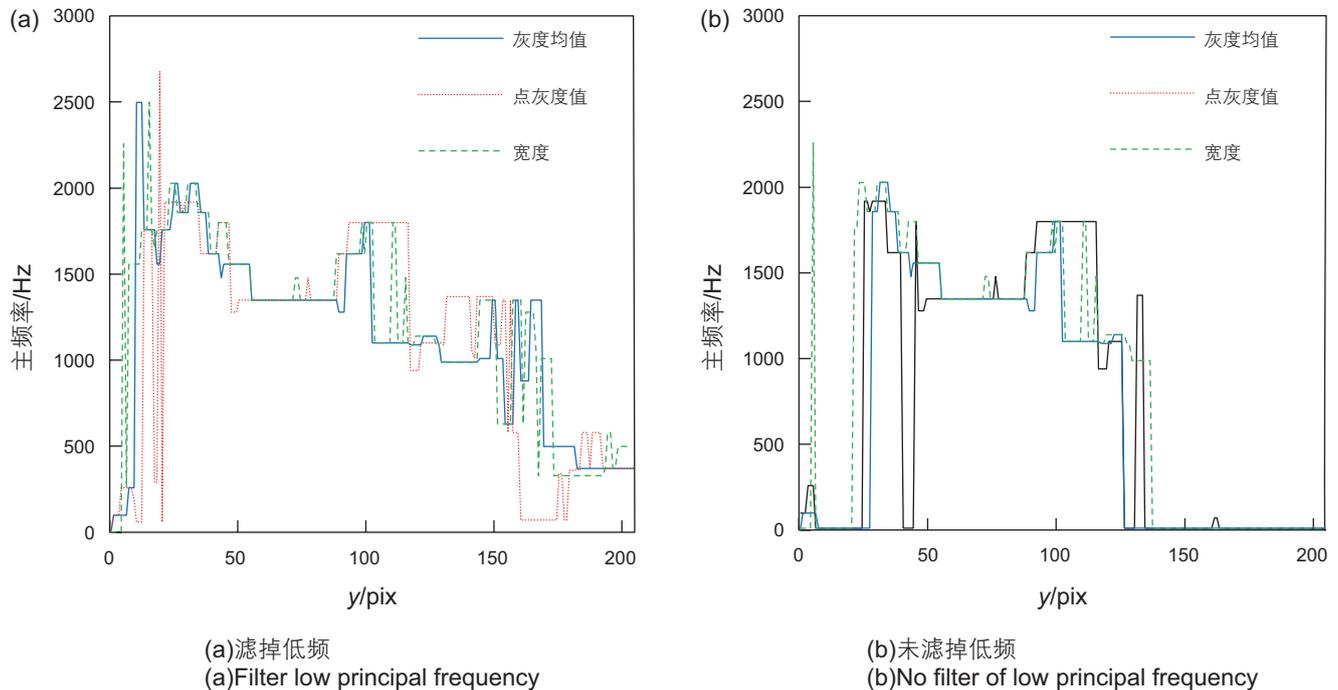


图 10 不同轴向位置 (y) 处的主频

Fig. 10 Principal frequency at different axial positions(y)

点灰度值和宽度曲线的变化趋势和灰度均值大致相同,但存在噪声导致的主频率突变,如宽度曲线在 5 pix 处的突变。由以上分析可知,变量取值位置对于确定空泡云脱落主频率有非常重要的影响,必须选取特定的位置才能得到正确的脱落频率。

3 结论

淹没空化射流中空泡云的脱落频率决定了空化破坏频率,直接影响储层改造效果。本文开展了高速摄影拍摄淹没空化射流实验,利用 FDM 方法对空泡云动态变化规律进行了深入分析,讨论了空泡云周期性脱落的机理,并首次研究了变量类型和变量取值位置对确定空泡云脱落频率的影响,优化了确定空泡云脱落频率的方法。本文研究完善了空化射流可视化研究方法,有助于加深对淹没空化射流动态特征的认识,并为优化喷嘴结构建立了基础。主要结论如下:

(1) 淹没空化射流中的空泡云具有明显的周期性,一个周期主要包括产生—发展—脱落—溃灭四个阶段,这与前人的结果相符,证明了本文中实验结果的正确性;柱塞泵的压力波动会影响空泡云的大小。

(2) 和灰度图相比, FDM 图能够更直观地确定空泡云进入溃灭阶段的时刻、空泡云溃灭位置等关键信

息,是观察空泡云动态特征的有效方法。

(3) 前人提出的“回流是导致空泡云周期性脱落的原因”的观点具有局限性,不能解释不带扩散段的喷嘴也能产生周期性脱落的空泡云的原因。本文认为空泡云周期性脱落与剪切层涡的周期性脱落、喷嘴结构以及空泡云导致的喷嘴过流面积变化(“憋压效应”)有关。

(4) 变量类型和取值位置均会对空泡云脱落功率谱造成影响,不能用空泡云长度和面积计算空泡云脱落频率;空泡云宽度、射流中心点灰度和灰度均值三种变量具有一定的等价性,其中灰度均值是最优选择;泵压波动对空泡云脱落的主频率没有显著影响;本文条件下空泡云脱落频率为 1 350 Hz。

(5) 只有在主频稳定区内取值才能得到正确的空泡云脱落频率,主频稳定区位于整个空化射流中部,该区域内空泡云充分发育,射流剪切层压力对空泡云的影响大于环境压力的影响。本文中的主频稳定区距离喷嘴出口 17.6~28.16 mm(无因次喷距 59~94)。

致谢

感谢中国石油大学(北京)石油工程学院晏鹏森硕士和刘习雄硕士在淹没空化射流高速摄影实验过程中的帮助。

参考文献

- [1] JOHNSON V, CHAHINE G, LINDENMUTH W, et al. Cavitating and structured jets for mechanical bits to increase drilling rate—Part I: Theory and concepts[J]. *Journal of energy resources technology*, 1984, 106(2): 282–288.
- [2] 李根生, 沈忠厚, 张召平等. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2003, 31(5): 11–13. [LI G S, SHEN Z H, ZHANG Z P, et al. Development and field tests of self-resonating cavitating water jet nozzle for oilwell drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(5): 11–13.]
- [3] 易灿, 李根生, 郭春阳, 等. 自振空化射流改善油层特性实验研究及现场应用[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 81–84, 88. [YI C, LI G S, GUO C Y, et al. Laboratory investigation and field application of self-resonating cavitation jet for improving polluted rock permeability[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 81–84, 88.]
- [4] SONG X, LI G, YUAN J, et al. Mechanisms and field test of solution mining by self-resonating cavitating water jets[J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(3): 385–389.
- [5] RESTIVO A, BRUNE M. Removing marine growth using an ROV with cavitation technology[C]// SPE. Offshore Technology Conference(2016). Houston: Society of Petroleum Engineers, 2016: 80–92.
- [6] VIJAY M, WENZHUO Y. Water jet cutting techniques for processing of hard rock material[J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1989, 3(2): 59–69.
- [7] GOGATE P R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes[J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(3): 335–358.
- [8] SOYAMA H, KIKUCHI T, NISHIKAWA M, et al. Introduction of compressive residual stress into stainless steel by employing a cavitating jet in air[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(10): 3 167–3 174.
- [9] WRIGHT M M, EPPS B, DROPKIN A, et al. Cavitation of a submerged jet[J]. *Experiments in fluids*, 2013, 54(6): 1–21.
- [10] YAMAGUCHI A, SHIMIZU S. Erosion due to impingement of cavitating jet[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, 109(4): 442–447.
- [11] HATTORI S, GOTO Y, FUKUYAMA T. Influence of temperature on erosion by a cavitating liquid jet[J]. *Wear*, 2006, 260(11): 1 217–1 223.
- [12] SOYAMA H. Effect of nozzle geometry on a standard cavitation erosion test using a cavitating jet[J]. *Wear*, 2013, 297(1): 895–902.
- [13] HUTLI E, NEDELJKOVIC M S, RADOVIC N A, et al. The relation between the high speed submerged cavitating jet behaviour and the cavitation erosion process[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 83: 27–38.
- [14] WATANABE R, YANAGISAWA K, YAMAGATA T, et al. Simultaneous shadowgraph imaging and acceleration pulse measurement of cavitating jet[J]. *Wear*, 2016, 358: 72–79.
- [15] 李根生, 沈忠厚, 李在胜等. 自振空化射流提高钻井速度的可行性研究[J]. *石油钻探技术*, 2004, 32(3): 1–4. [LI G S, SHEN Z H, LI Z S, et al. Feasibility study of self-resonating cavitating jet for augmenting drilling rate[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2004, 32(3): 1–4.]
- [16] 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: 23–28. [Li G S, SHEN Z H, Mechanism and applications of self-resonating cavitation jet[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008: 23–28.]
- [17] 卢义玉, 李晓红, 向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(8): 1 233–1 237. [LU Y Y, LI X H, XIANG W Y. Rock erosion mechanism of cavitating water jet[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1 233–1 237.]
- [18] 向文英, 卢义玉, 李晓红等. 空化射流在岩石破碎中的作用实验研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1 505–1 508. [XIANG W Y, LU Y Y, LI X H, et al. Experimental study of the function of cavitating water jet on rock-cutting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1 505–1 508.]
- [19] SOYAMA H, YAMAUCHI Y, ADACHI Y, et al. High-Speed observations of the cavitation cloud around a high-speed submerged water jet[J]. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 1995, 38(2): 245–251.
- [20] SAITO Y, SATO K. Instantaneous behavior of cavitation clouds at impingement of cavitating water-jet[C]// Proceedings of Sixth International Symposium on Cavitation. CAV2006, 2006.
- [21] SATO K, SUGIMOTO Y, OHJIMI S. Pressure-wave formation and collapses of cavitation clouds impinging on solid wall in a submerged water jet[C]// Proceedings of the 7th Int. Symposium on Cavitation. Ann Arbor: CAV2009, 2009: 209–214.
- [22] OOI K. Scale effects on cavitation inception in submerged water jets: a new look[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 151: 367–390.
- [23] RAN B, KATZ J. Pressure fluctuations and their effect on cavitation inception within water jets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 262: 223–263.
- [24] GOPALAN S, KATZ J, KNIO O. The flow structure in the near field of jets and its effect on cavitation inception[J]. *Journal of fluid mechanics*, 1999, 398: 1–43.

- [25] STRAKA W A, MEYER R S, FONTAINE A A, et al. Cavitation inception in quiescent and co-flow nozzle jets[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2010, 22(5): 813–819.
- [26] CHAHINE G, JOHNSON J V, KALUMUCK K, et al. Internal and external acoustics and large structures dynamics of cavitating self-resonating water jets[R]. Albuquerque(USA): Sandia National Labs, 1987.
- [27] BERESNEV I A, JOHNSON P A. Elastic-wave stimulation of oil production: a review of methods and results[J]. *Geophysics*, 1994, 59(6): 1 000–1 017.
- [28] VIJAY M, ZOU C, TAVOULARIS S. A study of the characteristics of cavitating water jets by photography and erosion[C]// *Proceedings of Tenth International Conference on Jet Cutting Technology*. 1990.
- [29] SOYAMA H. High-speed observation of a cavitating jet in air[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(6): 1 095–1 101.
- [30] SOYAMA H, NISHIZAWA K, MIKAMI M. Enhancement of cavitation aggressivity around a cavitating jet by injecting low-speed water jet for cavitation peening[C]// *Proceedings of the 7th Int. Symposium on Cavitation*. Ann Arbor: CAV2009, 2009: 209–214.
- [31] HUTLI E A, NEDELJKOVIC M S. Frequency in shedding/discharging cavitation clouds determined by visualization of a submerged cavitating jet[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(2): 021 304.
- [32] HUTLI E, NEDELJKOVIC M S, BONY R A, et al. Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 80: 281–292.
- [33] SATO K, SUGIMOTO Y, OHJIMI S. Structure of periodic cavitation clouds in submerged impinging water-jet issued from horn-type nozzle[J]. *Technology*, 2009, 9: 10.
- [34] SATO K, TAGUCHI Y, HAYASHI S. High speed observation of periodic cavity behavior in a convergent-divergent nozzle for cavitating water jet[J]. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 2013, 12(2): 195–201.
- [35] HAYASHI S, SATO K. Unsteady behavior of cavitating waterjet in an axisymmetric convergent-divergent nozzle: High speed observation and image analysis based on frame difference method[J]. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 2014, 3(5): 44–50.
- [36] YAMAUCHI Y, KAWANO S, SOYAMA H, et al. Formation of process of vortex ring cavitation in high-speed submerged water jet[J]. *JSME Int. J., Ser. B*, 1996, 62(593): 72–78.
- [37] PENG G, OGUMA Y, SHIMIZU S. Visualization observation of cavitation cloud shedding in a submerged water jet[M]// YU Z, Yang L, Huang L X, et al. *Fluid-Structure-Sound Interactions and Control*. Berlin: Springer, 2016: 229–234.
- [38] 卢义玉, 李倩, 李晓红等. 空化水射流空泡云长度的试验研究[J]. *流体机械*, 2006, 34(5): 9–11. [LU Y Y, LI Q, LI X H, et al. Experimental study on bubble cloud length of cavitating water jet[J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(5): 9–11.]
- [39] 卢义玉, 向文英, 李晓红. 淹没磨料射流的空泡运动分析[J]. *应用力学学报*, 2009, 2(1): 8–11. [LU Y Y, XIANG W Y, LI X H. Cavitation bubble dynamics in submerged abrasive jet[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009(1): 8–11.]
- [40] SOYAMA H, YAMAUCHI Y, SATO K, et al. High-speed observation of ultrahigh-speed submerged water jets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, 12(4): 411–416.
- [41] DULAR M, KHLIFA I, FUZIER S, et al. Scale effect on unsteady cloud cavitation[J]. *Experiments in fluids*, 2012, 53(5): 1233–1250.
- [42] NISHIMURA S, TAKAKUWA O, SOYAMA H. Similarity law on shedding frequency of cavitation cloud induced by a cavitating jet[J]. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2012, 7(3): 405–420.
- [43] SATO K, TAGUCHI Y, HAYASHI S. High speed observation of periodic cavity behavior in a convergent-divergent nozzle for cavitating water jet[J]. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 2013, 12(2): 12–19.
- [44] BRENNEN C E. *Cavitation and bubble dynamics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 184–191.
- [45] DULAR M, BACHERT R, STOFFEL B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2005, 24(4): 522–538.
- [46] JI B, LUO X, ARNDT R E, et al. Large eddy simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 68: 121–134.
- [47] PENG G. Computational study of unsteady cavitating vortex flow in axisymmetric submerged water jet[C]// *ASME. Fluids Engineering Division Summer Meeting (2005)*. Houston: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 1 557–1 563.
- [48] PENG G, SHIMIZU S. Progress in numerical simulation of cavitating water jets[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2013, 25(4): 502–509.

Dynamics of cavitation cloud in submerged cavitation water jet

PENG Chi, LI Gensheng, TIAN Shouceng

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Submerged cavitation water jet, with intensive cavitation erosion ability, has been extensively applied for various engineering purposes such as petroleum well drilling and reservoir stimulation. The dynamics of cavitation cloud are closely related to the erosion process of cavitation jet. In this paper, high-speed photography is utilized to visualize the cavitation jet. The dynamic features of cavitation cloud are illustrated using Frame Difference Method; the mechanism of periodic cavitation cloud shedding is discussed; and for the first time, the influences of variable type (the length, area, width of cavitation cloud, the gray level of points in jet center line and the average gray level) and variable position on determining the shedding frequency of cavitation cloud are clarified, based on which the optimal method to decide the shedding frequency is derived. The results show that cavitation cloud in submerged cavitation has evident periodicity. One cycle contains incubation, developing, shedding and collapse phases. The periodic shedding of cavitation cloud seems to be closely related to the shedding of vortex in the shear layer, the nozzle structure and the variety of nozzle open area as a result of the cavitation appearance and its 'chock effect'. Average gray level is believed to be the optimal viable for determining the shedding frequency of cavitation cloud. Under the experimental conditions in this paper, the shedding frequency of cavitation cloud is decided to be 1 350 Hz. The region where shedding frequency is stable ranges from 17.6 mm to 28.16 mm from the nozzle outlet. This paper provides an important supplement for understanding the dynamics of cavitation cloud in submerged cavitation jet and builds the foundation of optimizing the nozzle geometry based on shedding frequency.

Keywords submerged cavitation jet; cavitation cloud; dynamic change; shedding frequency; high-speed photography; FFT; frame difference method

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.021

(编辑 马桂霞)