

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0190



结构参数对自激脉冲射流 特性影响的统计分析

高传昌¹, 胡一伟^{1*}, 李欢¹, 马文良²

(1. 华北水利水电大学电力学院, 河南 郑州 450000; 2. 吉林敦化抽水蓄能有限公司, 吉林 敦化 133700)



高传昌

摘要: 为了得到水下自激吸气脉冲射流冲击特性较优的喷嘴结构参数配比,以自行研制的自激吸气脉冲射流喷嘴为研究对象,运用数理统计的方法就水下自激吸气脉冲射流冲击脉动压力试验数据的均方差、脉动压力峰值和时均压力随上下喷嘴面积比、腔长下喷嘴比和腔径腔长比的变化进行分析,并检验了水下自激吸气脉冲射流冲击脉动压力试验数据的平稳性和正态分布。由试验结果可知,当围压小于0.4 MPa时,上下喷嘴面积比范围为1.96~4.84,最优范围1.96~4.00;当围压 \leq 0.2 MPa时,腔长下喷嘴比范围2.8~4.4,最优值3.4,腔径腔长比范围为1.50~1.65或2.20~2.30,最优范围应为1.50~1.65。

关键词: 脉冲射流喷嘴;结构参数;水下;冲击特性;自激吸气;统计特征量

中图分类号: S277.9; TP69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)04-0327-07

高传昌, 胡一伟, 李欢, 等. 结构参数对自激脉冲射流特性影响的统计分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 327-333.

GAO Chuanchang, HU Yiwei, LI Huan, et al. Statistical analysis of effects of structural parameters on characteristics of underwater self-excited pulse jet[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2018, 36(4): 327-333. (in Chinese)

Statistical analysis of effects of structural parameters on characteristics of underwater self-excited pulse jet

GAO Chuanchang¹, HU Yiwei^{1*}, LI Huan¹, MA Wenliang²

(1. School of Electric Power, North China University of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou, Henan 450011, China; 2. Jilin Dunhua Pumped Storage Limited Company, Dunhua, Jilin 133700, China)

Abstract: In order to obtain the optimal ratio of the nozzle structure parameters of the underwater self-excited suction pulsed jet, taking the self-developed self-excited suction jet nozzle as study object, based on the theory of the mathematical statistics, the mean square error, pulsating pressure peak and time-averaged pressure from the pulsating pressure test data of underwater self-excited suction pulsed jet with the change of nozzle area ratio, cavity ratio and cavity length ratio were analyzed. The optimal ratio of the nozzle structure parameters of the underwater self-excited suction pulsed jet was obtained. When the confining pressure is less than 0.4 MPa, the upper and lower nozzle area ratio range is 1.96-4.84, and the optimal range is 1.96-4.00. When the confining pressure is less than or equal to 0.2 MPa, the cavity length is 2.8-4.4, the optimal value is 3.4, the cavity length ratio is 1.50-1.65 or 2.20-2.30, and the optimal range should be 1.50-1.65.

Key words: pulsed jet nozzle; structural parameters; underwater; impact characteristics; self-excited suction; statistical characteristics

收稿日期: 2017-08-18; 修回日期: 2017-09-20; 网络出版时间: 2018-03-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1508.206.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309099)

第一作者简介: 高传昌(1956—),男,河北邯郸人,教授(gcc@ncwu.edu.cn),主要从事流体机械工程研究。

通信作者简介: 胡一伟(1992—),女,河南濮阳人,硕士研究生(18237160678@163.com),主要从事流体机械工程研究。

自激脉冲射流的冲蚀效果优于连续射流,并具有体积小、构造简单、无动密封和不需外加附加驱动机构等优点,是一种具有良好应用前景的脉冲射流装置^[1],已被广泛应用于河道清淤、矿山开采、曝气充氧、清洗除锈和石油勘探等领域^[2-6]。

自激脉冲射流喷嘴结构参数主要包括上喷嘴直径 d_1 、下喷嘴直径 d_2 、振荡腔室的腔径 d_c 和腔长 L_c 以及碰撞体锥角 α ,上述结构参数的配比对脉冲射流的冲击性能影响很大。近年来,王乐勤等^[7]、曲延鹏等^[8]、刘新阳等^[9]针对自激脉冲射流喷嘴结构参数的配比在非淹没条件下对流场的影响进行了大量的试验研究,并得到了结构参数的最优配比范围。对非淹没自激吸气脉冲射流的研究方面,CHILLMAN 等^[10]、FALLENIUS 等^[11]、ANNONI 等^[12]主要就引入气体的进气方式(进气孔直径、数量和位置)、吸气量、工作压力和靶距对冲击性能的影响进行了探索,结果表明自激吸气脉冲水气射流显著提高了冲蚀效果;而刘新阳等^[13-15]关于淹没自激吸气脉冲射流的研究,除了对水下引入气体的进气方式、吸气量、工作压力和靶距研究外,还就不同结构参数的配比对冲击特性的影响进行了试验研究,结果表明淹没自激吸气脉冲射流也存在最优结构参数配比,使其冲蚀效果达到最佳。

然而,淹没条件下不同结构参数自激吸气脉冲射流冲击特性影响的统计特征的理论分析研究尚未报道,因此文中采用数理统计方法对淹没条件下自激吸气脉冲射流的冲击特性进行统计特征分析,以均方差、压力脉动峰值及时均压力3个统计特征量为指标,研究分析自激吸气脉冲射流喷嘴冲击特性随量纲一化结构参数的变化规律,希望能为其在水库清淤领域的应用提供理论基础。

1 试验装置及试验内容

1.1 试验装置

运用自行研制的淹没(围压)条件下自激吸气脉冲射流试验装置对其冲击特性进行试验研究。试验装置组成如图1所示。利用单级离心泵抽水注入压力容器内,通过调节稳定器稳定设计围压,即模拟设计水深,当压力容器围压稳定后,启动动力泵组提供工作水流。工作时水流量通过电磁流量计测量,采用闸阀控制设计工作时的水压,工作水流经管路输送给设置于压力容器内的自激吸气脉冲射流喷嘴,直接将经喷嘴形成的液气脉冲射流喷射于

靶盘中心,形成压力信号。数据采集仪通过压力变送器接收压力信号,连接计算机进行数据的存储与分析。

自激吸气脉冲射流喷嘴由上喷嘴、振荡腔、碰撞体、吸气孔和下喷嘴组成,如图2所示。

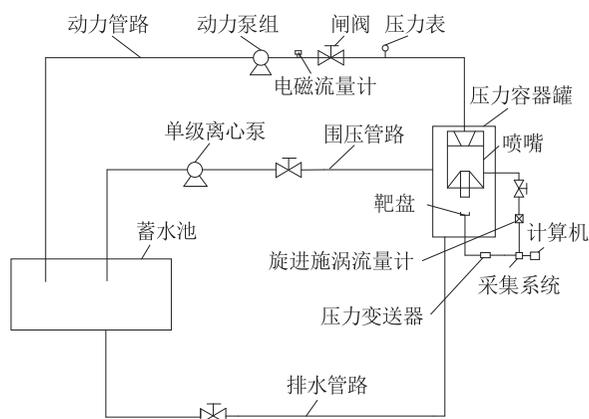


图1 自激吸气脉冲射流试验装置图
Fig. 1 Self-excited suction pulsed jet test device

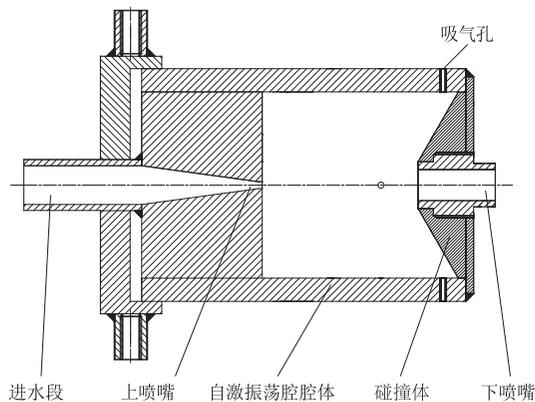


图2 自激吸气脉冲射流喷嘴示意图
Fig. 2 Schematic diagram of a self-excited suction pulsed jet nozzle

1.2 试验内容

采用的自激吸气脉冲射流喷嘴量纲一化结构参数配比:上下喷嘴面积比(d_2^2/d_1^2)范围为1.96~5.76,腔长下喷嘴比(L_c/d_2)范围为2.8~6.0,腔径腔长比(D_c/L_c)范围为1.5~2.3。工作压力范围为1.2~2.1 MPa,围压(模拟水深)范围为0.1~0.4 MPa(10~40 m),靶距为120 mm。在不同围压与工作压力条件下对上述不同结构参数配比的喷嘴进行冲击特性的试验研究,测得靶盘中心冲击力;设置采样频率为1500 Hz,采集时间为60 s。采集结束后对自激吸气脉冲射流冲击力进行统计特征分析,运用量纲一化的方法研究量纲为一的不同结构参数的自激吸气脉冲射流喷嘴对射流冲击力特性的影响。

2 统计特征值

一般而言,在进行水流脉动压力研究时,通常忽视脉动压力的影响,直接将其时均化,但研究脉冲射流中,脉动压力的作用不可忽略.严格而言,一切脉动现象都是随机发生的,振幅没有明显的规律,并且不能用精确的相关时间关系式表示任何脉动物理量,因而只可以运用数学领域中统计理论来表征脉动发生的过程.对于属于随机脉动信号的射流脉动、压力脉动,脉冲射流冲击力表示为

$$\bar{p} = p' + p, \quad (1)$$

式中: p 为瞬时射流冲击力; p' 为射流冲击脉动压力; \bar{p} 为时均压力.

描述随机脉动基本特性常用的统计学参数主要有:时均值、均方差、脉动幅值、冲击力脉动峰值、偏态系数和峰态系数.

2.1 时均值

随机脉动压力信号时均值 \bar{p} 是样本函数 $p(k)$ ($k=1,2,\dots,N$) 对时间坐标的平均积分,它表示随机脉动压力信号的变化趋势.时均值计算的表达式为

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p(k), \quad (2)$$

式中: N 为样本数; $p(k)$ 为样本函数.

2.2 均方差

均方差 σ 表示随机脉动压力信号脉动分量的强度.均方差越小,则冲击脉动压力的离散度越小,相应的脉动压力作用越弱,其射流冲击效果差;均方差越大,则冲击脉动压力的离散度较大,相应的压力作用越强,其射流冲击效果越好.均方差计算的表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [p(k) - \bar{p}]^2}. \quad (3)$$

2.3 脉动幅值与冲击力脉动峰值

在一组随机脉动压力信号中,取这个样本的最

大瞬时值 p_{\max} 和最小瞬时值 p_{\min} ,这2个值之差表示该组脉动压力的极端脉动幅值 Δp .由于瞬时值具有较强的随机性,不具备统计学意义,由此,在数据处理时,将采集到的位于同一组的随机脉动压力信号总体样本划分成若干子区间,所有的子区间具有完整的周期,进而求得每个子区间内的最大值和最小值,再将所有求得的最大值和最小值取平均值,得出 p_{\min}, p_{\max} .定义压力脉动幅值为

$$\Delta p = p_{\max} - p_{\min}, \quad (4)$$

式中: Δp 为脉动幅值; p_{\max} 为最大值也是冲击力脉动压力峰值.

2.4 峰态系数与偏态系数

峰态系数 c_e 表示脉动振幅概率分布曲线顶端平缓或陡峭的程度,计算表达式为

$$c_e = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{k=1}^N [p(k) - \bar{p}]^4 = E\left(\frac{p(k) - \bar{p}}{\sqrt{D(k)}}\right)^4. \quad (5)$$

偏态系数 c_s 表示脉动振幅概率分布形状偏离的程度,计算表达式为

$$c_s = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{k=1}^N [p(k) - \bar{p}]^3 = E\left(\frac{p(k) - \bar{p}}{\sqrt{D(k)}}\right)^3. \quad (6)$$

峰态系数与偏态系数是表征脉动压力幅值的重要特性,并且可以检验随机脉动信号的正态分布特征.

3 试验结果与分析

3.1 自激脉冲射流随机信号的统计特征分析

采用数理统计方法对采集到的自激脉冲射流随机信号进行分析,对数据进行正态检验与平稳性检验,数据处理的精度得到了提高,并对所采集信号数据是否满足处理要求进行了检验.

3.1.1 自激脉冲射流压力数据的平稳性检验

表1为射流脉动压力平稳性检验结果,表中 p_0 为工作压力, p_w 为围压.

表1 射流脉动压力平稳性检验结果

Tab.1 Jet pulsating pressure smoothness test results

指标	d_2/mm		L_c/mm	D_c/mm	p_0/MPa		p_w/MPa		L/mm	
	16	18	55	85	1.8	1.6	0.1	0.2	100	120
P	0.020	0.018	0.018	0.010	0.010	0.094	0.01	0.03	0.01	0.01

采集得到的脉动压力数据是1组时间序列,平稳性检验是对时间序列进一步分析的基础,在平稳性检验中最常用的是单位根检验,为确保采集到的

脉动压力数据是平稳性数列,对数据进行单位根检验.通过 matlab 对不同结构参数下采集的压力数据进行检验的结果如表1所示. P 值是结果可信度的

递减指标, P 小于 0.05 时, 将待检验压力数据视为平稳性序列; P 大于 0.05 时, 将待检验数据视为非平稳性序列. 从表 1 可以看出, 任何结构参数下 P 值都小于 0.05, 由此可以将采集到的自激吸气脉冲射流脉动压力数据认为是 1 组不随时间发生变化的平稳性序列.

3.1.2 自激脉冲射流脉动压力振幅概率分布特征

正态检验可以对脉动压力振幅概率分布特征进行分析, 脉动压力的时均值 \bar{p} 、均方差 σ 、峰态系数 c_e 、偏态系数 c_s 和脉动幅值 Δp , 这些都是描述脉动压力的特征值. 运用式(2) - (6) 对任一结构部分工况的射流脉动压力特征值进行分析, 如表 2 所示. 通过表 2 (其中围压、脉动幅值、时均压力单位均为

MPa) 可知, 射流脉动压力振幅分布的偏态系数 c_s 均小于 0.3, 峰态系数 c_e 大致在 3 左右, 由此表明射流脉动压力的振幅曲线基本对称, 其分布规律基本符合正态分布规律; 还可以看出吸气时射流脉动压力时均压力、均方差都大于相同工作状况下的不吸气时射流脉动压力对应值, 由此表明装置吸气状态时, 射流脉动压力的冲击性能相比不吸气时要更高.

由于射流脉动压力振幅基本符合正态分布的规律, 在描述射流脉动压力幅值分布特征时只需采用时均值和均方差这 2 个特征量. 除此之外, 压力脉动峰值对分析库底淤积的某些情况是比较重要的指标. 文中采用时均值、均方差、脉动压力峰值这 3 个特征量作为统计特征分析指标, 进行结构参数对自激吸气脉冲射流冲击特性的影响研究.

表 2 射流脉动压力特征值
Tab. 2 Jet pulsating pressure characteristic values

工况	围压(模拟水深)0.1 MPa					围压(模拟水深)0.2 MPa					
	σ	c_s	c_e	$\Delta p/\text{MPa}$	\bar{p}/MPa	σ	c_s	c_e	$\Delta p/\text{MPa}$	\bar{p}/MPa	
吸气	1	0.063	0.174	2.995	0.431	0.485	0.049	0.175	2.948	0.306	0.293
	2	0.061	0.161	3.058	0.384	0.441	0.044	0.169	2.902	0.290	0.282
	3	0.056	0.166	2.946	0.380	0.371	0.041	0.153	2.833	0.274	0.242
	4	0.052	0.154	2.922	0.342	0.323	0.038	0.215	2.823	0.259	0.209
	5	0.043	0.206	2.929	0.289	0.276	0.0340	0.229	2.716	0.221	0.166
不吸气	1	0.051	0.136	2.992	0.355	0.360	0.045	0.124	2.931	0.339	0.285
	2	0.046	0.193	2.960	0.300	0.327	0.042	0.157	2.869	0.269	0.257
	3	0.039	0.159	2.934	0.264	0.2660	0.037	0.203	2.849	0.249	0.200
	4	0.035	0.183	2.898	0.242	0.226	0.034	0.230	2.766	0.222	0.170
	5	0.032	0.217	2.779	0.201	0.184	0.031	0.251	2.654	0.199	0.126

3.2 结构参数对自激吸气脉冲射流特性的影响

3.2.1 不同面积比的影响

图 3 为不同面积比对射流冲击脉动压力时均压

力、均方差和脉动压力峰值的影响. 在围压 0.3, 0.4 MPa 下, 不同工作压力的脉动压力均方差、脉动压力峰值和时均压力均随喷嘴面积比的增加而逐渐减小.

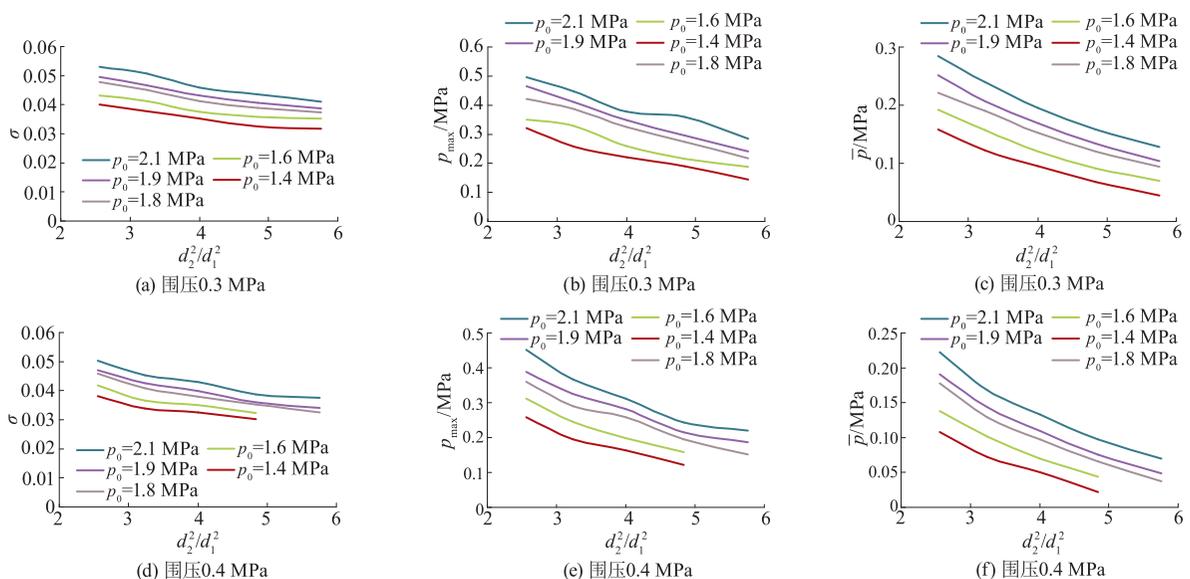


图 3 不同面积比对射流冲击脉动压力时均压力、均方差和脉动压力峰值的影响

Fig. 3 Effect of different nozzle area ratios on jet pulsation pressure variance, pulsating pressure peak and time-averaged pressure

可见,不同的面积比显著地影响了自激吸气脉冲射流的冲击特性.若喷嘴面积比过大,工作射流的部分流体经振荡腔直接经下喷嘴射出,部分工作流体由于冲击碰撞壁进而加剧流体扰动的作用不明显,其相应的扰动-反馈-放大作用减弱,使得振荡腔内的脉动压力峰值减小,同时喷嘴面积比过大,会导致振荡腔内出现次生涡,这将抑制腔内脉动压力的强度.腔内压力脉动峰值的减小和强度的减弱,导致脉冲射流冲击性能的下降.

从图3可知,在围压0.4 MPa下,当工作压力为1.4 MPa和1.6 MPa时,水下自激吸气脉冲射流冲击特性试验做到喷嘴面积比4.84,这是因为在较低工作压力下,围压和喷嘴面积对自激吸气脉冲射流冲击特性影响较大,围压越高也难于产生自激吸气脉冲射流^[13].综上所述,在围压小于等于0.4 MPa时,水下自激吸气脉冲射流冲击特性较好的最优喷

嘴面积比范围是1.96~4.84,最佳范围是1.96~4.00,这与文献[14-15]试验结果一致,但与非淹没自激脉冲射流的试验结果有差别^[7-9].

3.2.2 腔长下喷嘴比的影响

图4为喷嘴直径和腔径不变的条件下,不同腔长下喷嘴比(L_c/d_2)对射流冲击脉动压力均方差、脉动压力峰值和时均压力影响的曲线图.由图可见,射流冲击脉动压力均方差、脉动压力峰值和时均压力随腔长下喷嘴比的增大,先增大到最大值而后逐渐降低并趋于稳定;在腔长下喷嘴比为2.8~4.4时,脉动压力时均压力、均方差和脉动压力峰值相比于其他腔长下喷嘴比的值要大,其中当上述3个统计特征值达到最大时腔长下喷嘴比约为3.4.因此,自激吸气脉冲射流冲击脉动压力作用强、冲击效果好的腔长下喷嘴比最优范围为2.8~4.4,与文献[14]的试验结果基本一致.

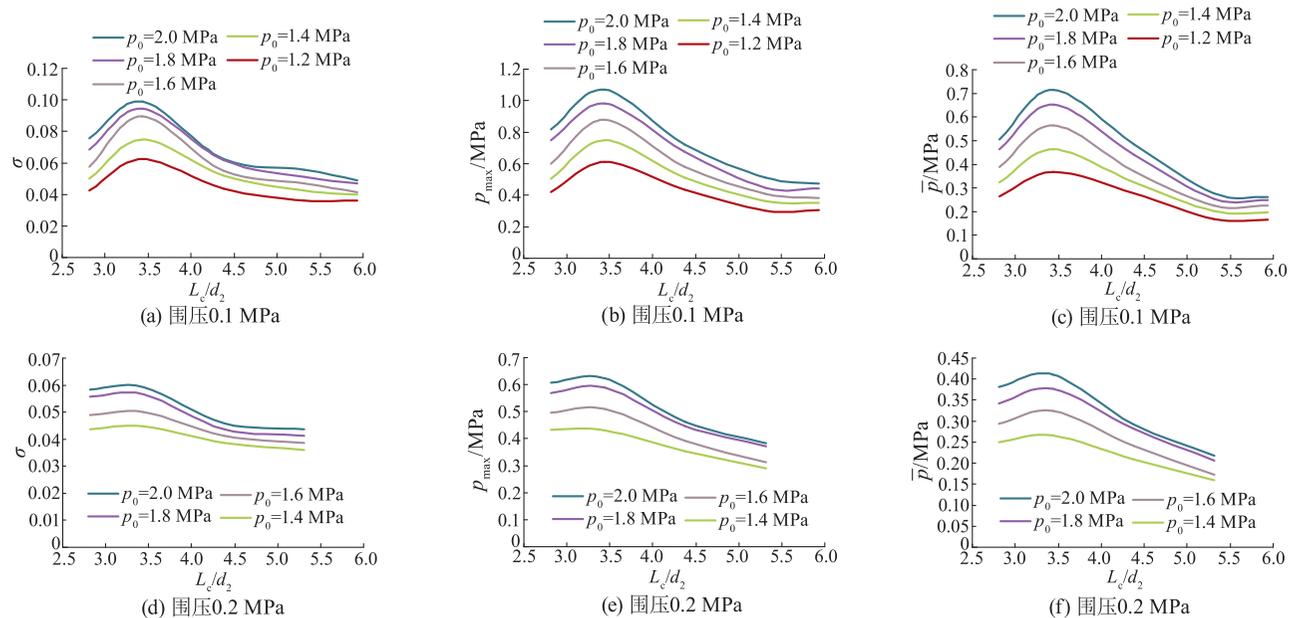


图4 不同腔长下喷嘴比对射流冲击脉动压力时均压力、均方差和脉动压力峰值的影响

Fig. 4 Effect of nozzle area ratios on impulse pressure variance, pulsating pressure peak and time-averaged pressure under different cavity lengths

3.2.3 腔径腔长比的影响

当喷嘴的面积比不变时,射流冲击脉动压力的时均压力、均方差和脉动压力峰值3个特征量随腔径腔长比(D_c/L_c)的变化曲线如图5所示.由图5可以看出,不同工作压力下的射流冲击压力的3个特征量在同一围压下随 D_c/L_c 的变化趋势基本相同,均随着 D_c/L_c 的增加从较大值减小后又小幅度上升变化再上升到较大值,在 D_c/L_c 为1.7时达到最大值,在 D_c/L_c 为1.5和2.3时,围压为0.1 MPa时分

别为最大值和较大值,而围压为0.2 MPa时同为最大值;当 D_c/L_c 在1.7~2.2时,射流冲击压力的3个特征量的变化不大且比其他腔径腔长比下的值要小,说明射流冲击压力脉动的强度在此范围内的冲击性能差.研究结果说明,自激吸气脉冲射流冲击脉动压力强和冲击效果好的腔径腔长比范围应为1.50~1.65,这与文献[14-15]的试验结果一致,但与非淹没自激脉冲射流的腔径腔长比的范围有所不同^[7-9].

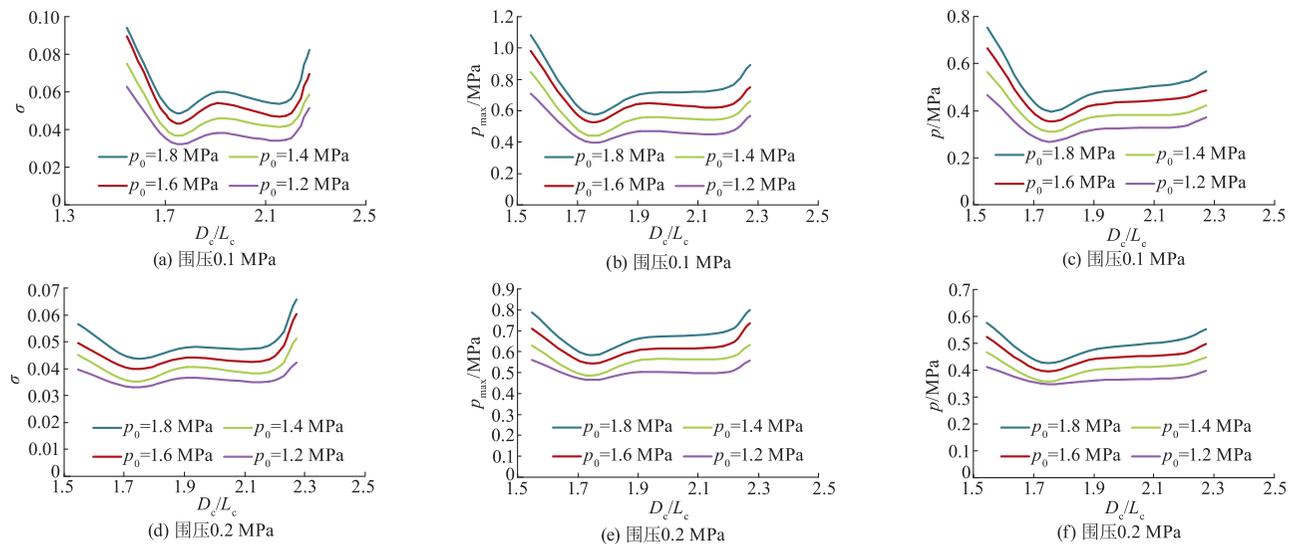


图5 不同腔径腔长比对射流冲击脉动压力时均压力、均方差和脉动压力峰值的影响

Fig. 5 Effect of different cavity length ratios on jet pulsation pressure variance, pulsating pressure peak and time-averaged pressure

4 结 语

以自行研制的自激吸气脉冲射流喷嘴为研究对象,采用数理统计的方法对淹没条件下自激吸气脉冲射流的冲击特性进行统计特征分析,所得结论如下:

1) 运用数理统计方法检验了水下自激吸气脉冲射流冲击脉动压力试验数据的平稳性和正态分布,采用均方差、压力脉动峰值和时均压力3个统计特征量研究了结构参数对水下自激吸气脉冲射流冲击特性的影响,初步得到脉冲射流冲击特性较优的喷嘴结构参数配比。

2) 当围压 ≤ 0.4 MPa时,喷嘴面积比范围为1.96~4.84,最优范围1.96~4.00;当围压 ≤ 0.2 MPa时,腔长下喷嘴比范围为2.8~4.4,最优值为3.4;腔径腔长比为1.50~1.65或2.20~2.30,最优范围应为1.50~1.65,并对相应的试验结果进行了对比验证。

文中虽然就水下的结构参数对自激吸气脉冲射流冲击脉动压力特性进行了初步分析,但射流的不同冲击靶距、喷嘴吸风量、工作压力和处于水下的环境等较多因素都会影响水下脉冲射流冲击特性,要使自激吸气脉冲射流喷嘴用于实际工程,特别是深水水库(高围压)淤泥处理工程,还需要进行更具系统性的理论与试验分析,进而得到不同水深下的喷嘴最优结构参数配比,为工程应用提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] 李晓红, 杨林. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 641-644.
LI Xiaohong, YANG Lin. The natural frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed water jet device[J]. Journal of China coal society, 2000, 25(6): 641-644. (in Chinese)
- [2] 司鹤, 薛永志, 周维. 自激振荡脉冲射流破岩效率数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 149-153.
SI Gu, XUE Yongzhi, ZHOU Wei. Numerical simulation of rock fragmentation efficiency under self-excited oscillation pulsed jet [J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(20): 149-153. (in Chinese)
- [3] 胡东, 王晓川, 康勇, 等. 自振脉冲气液射流振荡及其冲蚀煤岩效应[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 983-989.
HU Dong, WANG Xiaochuan, KANG Yong, et al. Oscillating characteristics of the self-excited pulsed air-water jet and its erosion performance of coal-rock [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(6): 983-989. (in Chinese)
- [4] 杨家林, 周利坤, 冯彦辉. 自激振荡脉冲清洗射流研究及应用现状[J]. 清洗世界, 2013, 29(1): 29-32.
YANG Jialin, ZHOU Likun, FENG Yanhui. Research and application situation of the self-excited oscillation cleaning jet [J]. Cleaning world, 2013, 29(1): 29-32. (in Chinese)
- [5] 裴江红, 张仕进. 自激振荡脉冲射流曝气器在生活污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2014(1): 77

- 80.
PEI Jianghong, ZHANG Shijin. Application of self-excited oscillation pulsed jet aerator for the treatment of sanitary sewage [J]. Technology of water treatment, 2014(1):77-80. (in Chinese)
- [6] 向文英,程光均,李晓红,等.水射流气举在水库河道环境疏浚与清淤中的应用[J].重庆大学学报(自然科学版),2005,28(8):129-131.
XIANG Wenying, CHENG Guangjun, LI Xiaohong, et al. Research of application about environment dredging on river and reservoir with water jet airlift[J]. Journal of Chongqing University (natural science edition), 2005, 28(8):129-131. (in Chinese)
- [7] 王乐勤,王循明,徐如良,等.自激振荡脉冲喷嘴结构参数配比试验研究[J].工程热物理学报,2004,25(6):956-958.
WANG Leqin, WANG Xunming, XU Ruliang, et al. Experimental study on structural parameters optimized design of the self-excited oscillation pulsed jet nozzle [J]. Journal of engineering thermophysics, 2004, 25(6):956-958. (in Chinese)
- [8] 曲延鹏,李春峰,隋荣娟,等.自激脉冲喷嘴结构参数对涡环影响的数值分析[J].山东大学学报(工学版),2006,36(2):17-21.
QU Yanpeng, LI Chunfeng, SUI Rongjuan, et al. The numerical analysis on structural parameters of self-excited pulsed jet to the eddy ring[J]. Journal of Shandong University (engineering science edition), 2006, 36(2): 17-21. (in Chinese)
- [9] 刘新阳,王松林,高传昌,等.自激脉冲射流装置参数对性能影响试验研究[J].振动与冲击,2012,31(24):112-114.
LIU Xinyang, WANG Songlin, GAO Chuanchang. Effects of parameters of a self-excited pulsed jet equipment on its performance [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(24):112-114. (in Chinese)
- [10] CHILLMAN A, RAMULU M, HASHISH M. Waterjet and water-air jet surface processing of a titanium alloy: a parametric evaluation [J]. Journal of manufacturing science & engineering, 2010, 132(1):165-174.
- [11] FALLENIOUS B E G, SATTARI A, FRANSSON J H M, et al. Experimental study on the effect of pulsating inflow to an enclosure for improved mixing [J]. International journal of heat & fluid flow, 2013, 44(4):108-119.
- [12] ANNONI M, ARLEO F, MALMASSARI C. CFD aided design and experimental validation of an innovative air assisted pure water jet cutting system [J]. Journal of materials processing technology, 2014, 214(8):1647-1657.
- [13] 刘新阳,高传昌,刘玉龙,等.水下自激吸气式脉冲射流装置冲击性能试验[J].振动与冲击,2015,34(24):188-191.
LIU Xinyang, GAO Chuanchang, LIU Yulong, et al. Impact performance tests of underwater self-excitation inspiration pulsed jet equipment [J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(24):188-191. (in Chinese)
- [14] 刘新阳,高传昌,胡亚州,等.吸气对水下自激脉冲射流装置压力特性的影响[J].应用基础与工程科学学报,2016(2):282-294.
LIU Xinyang, GAO Chuanchang, HU Yazhou, et al. Influence of inspiration on pressure characteristics for underwater self-excited pulsed jet device [J]. Journal of basic science and engineering, 2016(2):282-294. (in Chinese)
- [15] 刘新阳,高传昌,张川,等.自激吸气式脉冲射流装置压力及流动特性研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(3):41-47.
LIU Xinyang, GAO Chuanchang, ZHANG Chuan, et al. Study on pressure and flow characteristics for self-excited inspiration pulse jet device [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2016, 48(3):41-47. (in Chinese)

(责任编辑 朱漪云)