

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.006

基于正交试验的壅塞空化器数值试验

单礼伟, 张凤华, 唐川林, 卓 杜, 周昌正, 贺照云, 蒋 浩

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 影响空化强度的因素较多, 如空化器结构形状与参数的不同组合, 系统水力参数的不同组合, 以及它们之间的相互匹配等。基于正交试验的方法, 利用 Fluent 软件对不同结构参数和水力参数的壅塞空化器进行数值模拟试验, 建立在不同参数组合下以壅塞空化器内空隙率和背压力为特征的正交试验评价指标, 研究各因素对壅塞空化器空化强度的影响程度。结果表明: 影响空化强度的因素从大到小依次是流量 Q 、背压 P_b 、入口锥角 γ 、壅塞管直径 d 和长度 L , 最优壅塞空化的参数组合是流量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、背压为 70 kPa 、入口锥角为 35° 、壅塞管直径为 10 mm 和长度为 50 mm 。

关键词: 壅塞空化; 空化器; 数值模拟; 正交试验

中图分类号: TP602

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0034-04

Numerical Simulation for Choking Cavitator Based on Orthogonal Experiment

Shan Liwei, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, Zhuo Du, Zhou Changzheng, He Zhaoyun, Jiang Hao

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: There are many factors impacting on the cavitation intensity, such as the different combination of cavitation device structure shape and parameters, the different combination of hydraulic parameters and their mutual matching, etc. Based on the orthogonal experiment method, applies Fluent software to make numerical simulation on the choking cavitator of different structure parameters and dynamic parameters, builds orthogonal experiment evaluating index with the characteristics of void fraction and static pressure in choking cavitator under different parameters combination, and investigates the factors' influence on the cavitation intensity. The results indicate that the factors affecting cavitation intensity from big to small are flow rate Q , back pressure P_b , inlet angle γ , diameter d and length L of choking pipe. The optimal parameters for choking cavitation are Q of $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, P_b of 70 kPa , γ of 35° , d and L of 10 mm and 50 mm .

Keywords: choking cavitation; cavitator; numerical simulation; orthogonal test

0 引言

水力空化装置具有结构简单、能耗低、成本低等优点, 在食品消毒^[1]、细胞壁的破碎^[2]、污水处理^[3]等领域得到应用。易灿等^[4]进行了喷嘴结构对空化起始影响的实验研究, 结果表明喷嘴结构明显影响空化起始能力, 自振空化喷嘴和双射流喷嘴比普通

锥形喷嘴有更大的起始空化数, 且起始空化数大都在 1.0 以上, 而锥形喷嘴的最大仅为 0.43。李根生等^[5]通过改变喷嘴扩散角, 对自振空化水射流喷嘴进行了大量的试验研究发现, 在一定的入口压力条件下, 喷嘴的扩散角为 120° 时效果最佳。廖振方等^[6]研究了自激振荡脉冲空化射流喷嘴出口流道形状对空化

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374101), 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5014)

作者简介: 单礼伟(1988-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为水力空化处理污水,

E-mail: shanliwei819@126.com

通信作者: 张凤华(1960-), 男(彝族), 云南弥勒人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事水射流技术及应用方面的研究,

E-mail: fenghua387@126.com

射流空化效果的影响,并应用到辅助牙轮钻井中,机械钻速、钻头进尺平均分别提高大于30%和11%。上述文献就影响喷嘴空化强度的单个因素做了研究或优化,并取得了一定的成果,但研究多个因素组合变化的情况却少见研究报道。影响空化强度的因素很多,如空化器结构形状与参数的不同组合,系统水力参数的不同组合,以及它们之间的相互匹配等。壅塞空化器是根据气液两相流产生壅塞空化现象理论设计的一种水力空化装置^[7],具有较强的空化能力。本文基于正交试验的方法,利用Fluent软件对不同结构参数和水力参数的壅塞空化器进行数值模拟试验,在不同参数组合下建立以壅塞空化器内空隙率和背压力为特征组成的正交试验评价指标,研究多因素不同组合对壅塞空化器空化强度的影响,优化壅塞空化器的结构参数和水力参数。

1 模型和网格

建立壅塞空化器的二维结构模型,如图1所示。结构模型的主要参数有入口锥角 γ 、壅塞管长度 L 和直径 d 。

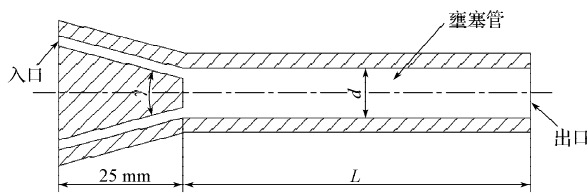


图1 壅塞空化器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of choking cavitator's structure

利用Gambit软件进行建模和网格处理。为提高网格质量,将壅塞空化器的结构模型分为入口环形狭缝和壅塞管,两部分分别划分网格。因为计算区域具有对称性,所以只建立一半网格以减少计算量,节约时间。采用Pave网格类型,网格节点数约为1.1万个。网格划分如图2所示。

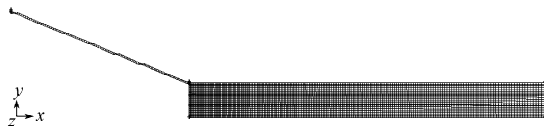


图2 壅塞空化器的网格划分

Fig. 2 Grid generation of choking cavitator

2 算法与边界条件

湍流模型采用Realizable $k-\zeta$ 模型。求解器参数设定为非耦合隐式求解,一阶迎风格式,其他参数设置为默认。计算和分析时,压力均采用绝对压力。各项计算以残差低于 10^{-6} 且进、出口流量偏差低于0.5%

作为收敛标准。

边界条件设置:入口为速度入口;出口为压力出口;壁面采用静止、无滑移边界条件,壁面附近采用标准壁面函数法处理;环境压力为常压,即101 325 Pa;参考温度为288.16 K,不考虑重力的影响;仿真流体定义为水(liquid-water);air在入口和出口处含量为1%,其他条件保持缺省值;出口压力为背压 P_b 。

3 数值试验

3.1 正交试验设计

把壅塞空化器的结构参数(入口锥角 γ 、壅塞管长度 L 和直径 d ,见图1)和主要工作参数(流量 Q 和背压 P_b)等5个因素作为研究的变量,利用正交试验方法,通过Fluent软件进行数值试验,探究利于产生空化的参数组合。每个因素取4个水平,各水平的取值见表1。

表1 因素水平

Table 1 Level of factors

水平	因素				
	$\gamma/(^\circ)$	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	P_b/kPa	L/mm	d/mm
1	25	0.5	10	50	8
2	35	1.0	70	60	9
3	45	1.5	130	70	10
4	55	2.0	190	80	11

根据正交表设计理论^[8],选用5因素4水平正交表 $L_{16}(4^5)$,如表2所示。从表2可知,为得到产生空化强度较大的壅塞空化器参数和工作参数的组合,需进行16次试验,这虽然较 $4^5=1\ 024$ 次试验相比减少了试验次数,但进行16次试验需要准备16个壅塞空化器,制造和实验检测的周期长。而通过CFD(computational fluid dynamics)对壅塞空化器进行数值试验研究,可对壅塞空化器的设计和改进快速地提供多方案的参考。

3.2 正交试验评价指标

在表2中试验号为12的Fluent仿真结果见图3和图4,它们分别是壅塞空化器轴心线上空隙率 α 和压力 P_f 的分布曲线。

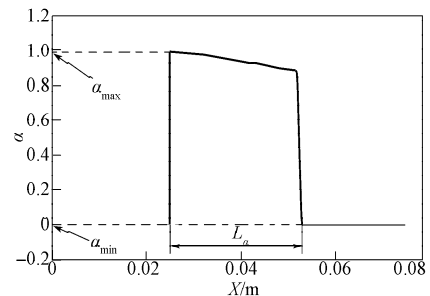


图3 轴心线上空隙率分布曲线

Fig. 3 Distribution of void fraction along the axis

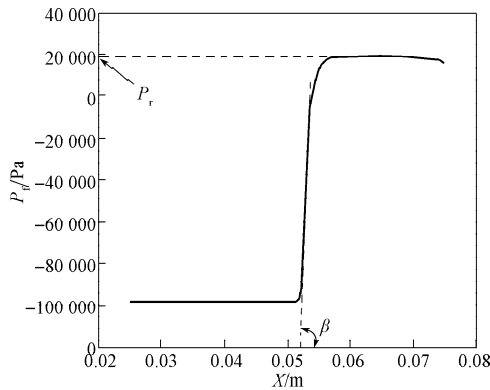


图4 轴心线上压力分布曲线

Fig. 4 Distribution of pressure along the axis

图3和4中曲线起始横坐标 ($X=25\text{ mm}$, 见图1), 对应堵塞管入口, 即堵塞管最前端, 收缩端结束处。空隙率是指气液混合相中气相所占的体积比例, 定义为

$$\alpha = V_0/V, \quad (1)$$

式中: V_0 是气液两相流中气相所占体积, m^3 ;

V 是气液两相流总体积, m^3 。

由图3~4可知, 堵塞管入口处轴心线上的负压达到最大 (-0.1 MPa , 见图4), 液体汽化形成大量空泡, 导致空隙率达最大 ($\alpha=0.99$)。由图4可知, 在堵塞管上游存在一段负压区 ($X=25\sim 51\text{ mm}$), 在此区域内空泡初生并不断长大。随着气液两相空泡向堵塞管下游流动, 在堵塞管下游 X 为 $51\sim 53\text{ mm}$ 处形成堵塞现象, 堵塞截面处压力恢复梯度很大 (压力梯度的 145 MPa/m), 足以使所有的空泡快速溃灭, 空隙率也随之降为0, 见图3。

根据数值模拟结果分析和前期试验研究的结论^[9-11], 堵塞空化器内的空化强度跟所产生的空泡数及空泡的有效溃灭程度有关。产生的空泡数量越多 (用空隙率 α 最大值 α_{max} 表征, 见图3), 溃灭前的空泡直径越大 (用空泡生长长度 L_α 表征, 见图3), 空化强度越强; 空泡的有效溃灭程度越高, 空化强度越强。所谓空泡有效溃灭即空泡得到快速、全部溃灭。堵塞截面两侧的压力恢复梯度 (用曲线斜率 $K=\tan \beta$ 表征, β 为压力恢复段切线与 X 轴夹角, 见图4) 越大, 溃灭前液体对空泡壁的压力 (用 P_r 的最大值表征, 见图4) 越大, 空泡越能有效地溃灭, 空化强度就越强。但是, α 和 L_α 增大超过一定值后, K 和 P_r 会减小; K 和 P_r 增大超过一定值后, α 和 L_α 也会减小。这些参数之间的相互影响是很复杂的。 α , L_α , K 和 P_r 通过 Origin 软件的计算得到 (K 是通过插件 Tangent Lines 计算得到)。

根据以上分析, 提出正交实验评价指标 B 为

$$B=0.4*K+0.25*L_\alpha/L+0.2*P_r/P_i+0.15*\alpha_{\text{max}}, \quad (2)$$

式中: P_r 为堵塞截面处恢复压力 (堵塞截面后侧静压力), Pa ;

P_i 为由入口流量计算的堵塞空化器入口压力, Pa ;

L_α 为空泡生长长度, m ;

L 为堵塞管长度, m 。

表2 正交试验

Table 2 Orthogonal test

水平	因素						B
	γ	Q	P_b	L	d		
1	1	1	1	1	1	0.214 9	
2	1	2	2	2	2	0.302 0	
3	1	3	3	3	3	0.270 1	
4	1	4	4	4	4	0.605 3	
5	2	1	2	3	4	0.517 5	
6	2	2	1	4	3	0.557 6	
7	2	3	4	1	2	0.404 2	
8	2	4	3	2	1	0.522 3	
9	3	1	3	4	2	0.001 5	
10	3	2	4	3	1	0.300 9	
11	3	3	1	2	4	0.293 4	
12	3	4	2	1	3	0.811 6	
13	4	1	4	2	3	0.056 4	
14	4	2	3	1	4	0.068 5	
15	4	3	2	4	1	0.268 0	
16	4	4	1	3	2	0.792 4	
水平 1 Σ_1 B/4	0.348 1	0.197 6	0.464 6	0.374 8	0.326 5		
水平 2 Σ_2 B/4	0.500 4	0.307 3	0.474 8	0.293 5	0.375 0		
水平 3 Σ_3 B/4	0.351 9	0.308 9	0.215 6	0.470 2	0.424 0		
水平 4 Σ_4 B/4	0.296 3	0.682 9	0.341 7	0.358 1	0.371 2		
极差 R(B)/4	0.204 1	0.485 3	0.259 2	0.064 6	0.097 5		
最优值	35	2	70	50	10		

4 结果分析

4.1 各因素影响堵塞空化强度的顺序及最优组合

从表2可看出, 极差 R 从大到小的顺序依次是 $0.485\ 3$, $0.259\ 2$, $0.204\ 1$, $0.097\ 5$, $0.064\ 6$, 与之相对应的是 Q , P_b , γ , d 和 L 。因此影响空化强度的因素从大到小的排列为 Q , P_b , γ , d 和 L 。

因素流量 Q 在第4水平时对应的 B 最大, 因此流量的最优值取 $2\ \text{m}^3/\text{h}$ 。按同样的方法可以得到各因素的最优值: 背压 P_b 取 $70\ \text{kPa}$, 入口锥角 γ 取 35° , 堵塞管直径 d 取 $10\ \text{mm}$ 和堵塞管长度 L 取 $70\ \text{mm}$ 。

4.2 流量对堵塞空化强度的影响

一般情况下, 堵塞空化器入口流量 Q 越大, 堵塞空化器内单位时间内产生的空泡数越多, 越多的空泡溃灭, 形成的空化强度越大。空化数 C 定义为

$$C = \frac{P_b - P_v}{0.5\rho v^2}, \quad (3)$$

式中: P_v 为相应温度下水的饱和蒸汽压强, Pa ;

v 为壅塞管内液体平均流速, m/s;

ρ 为水的密度, kg/m³。

式(3)中, P_v 只与温度有关。当液体温度和 P_b 保持不变时, 流量 Q 增大, 水的流速增大, 空化数 C 变小。空化数 C 越小越易发生空化, 因此 Q 增大, 空化强度增强。

从表2可知, Q 从第1水平(0.5 m³/h)到第4水平(2 m³/h), 流量 Q 增大, B 值增大, 在试验范围内, 流量越大壅塞空化强度越强。这和文献[12]所得规律一致。

4.3 背压对壅塞空化强度的影响

背压 P_b 是影响壅塞空化的一个重要因素, 它直接影响空泡溃灭的强度, 即空化强度。

根据 Rayleigh 推导的空泡溃灭时产生瞬时最大压力公式为

$$P_c = \frac{P_r}{6.35} \left(\frac{R_0}{R_r} \right)^3, \quad (4)$$

式中: P_c 为空泡溃灭时的压力, Pa;

P_r 为空泡溃灭时周围液体的静压, Pa;

R_0 为空泡溃灭前的空泡半径, m;

R_r 为空泡溃灭后空泡半径, m。

P_b 增大, 则空泡溃灭时周围液体的静压 P_r 随之增大。由式(4)可知, 空泡溃灭时产生瞬时压力 P_c 增大, 空化强度增大。由表2可知, P_b 从第1水平(10 kPa)到第4水平(190 kPa), 逐渐增大, B 先变大后变小。当 P_b 为第2水平(70 kPa)时, B 取得最大值。其原因是 P_b 较小时, 空泡在小的恢复压力下溃灭时产生的空化强度不大, 形成的空化强度也较小。 P_b 增大壅塞截面会逐渐向壅塞管上游移动^[13], 当 P_b 超过一定值时, 由于壅塞截面向壅塞管上游移动过多, 空泡生长的区域变小, 空泡来不及长大就溃灭了, R_0 较小, 由式(4)可知, 空泡溃灭形成的空化强度小。

4.4 入口锥角对壅塞空化强度的影响

入口锥角 γ 从第1水平(25°)到第4水平(55°)逐渐增大, B 值先增大后减小。 γ 取第2水平(35°)时, B 取得最大值。当 γ 小时, 收缩截面变化率小, 高速水流和低速水流交汇点距喷嘴入口远, 相互作用区域增长, 射流能量消耗大, 产生的负压低, 形成空泡数量少, 导致空化强度弱。当 γ 过大时, 收缩截面变化率过大, 高速水流和低速水流交汇点向喷嘴入口靠近, 负压区域缩小, 空泡生长时间变短, 形成的空化强度弱。因此 γ 等于 35° 时, 壅塞空化强度较大。

4.5 出口直径和壅塞管直径对壅塞空化强度的影响

d 和 L 对应的极差 R 分别为 0.097 5 和 0.064 6, 说明 d 在 8~11 mm 范围内和 L 在 50~80 mm 范围内变化对壅塞空化强度影响都较小。从壅塞空化器结构紧凑的角度, 综合考虑其它因素的影响, 建议 L 取 50 mm, d 取 10 mm。

5 结论

基于正交实验的方法, 利用 Fluent 软件对壅塞空化器不同结构尺寸和水力参数的组合进行空化流动模拟, 分析了不同入口锥角、流量、背压、壅塞管长度和直径对壅塞空化效果的影响, 得到如下结论。

1) 影响空化强度的因素从大到小的排列: 流量 Q , 背压 P_b , 入口锥角 γ , 壅塞管直径 d 和长度 L 。

2) 最优参数组合: 流量 Q 为 2 m³/h, 背压 P_b 为 130 kPa, 入口锥角 γ 为 35°, 壅塞管直径 d 为 10 mm 和长度 L 为 50 mm。

3) 一定范围内流量越大, 空化强度越大; 存在一个最佳背压使壅塞空化强度达到最大。壅塞管长度 L 和直径 d 试验范围内变化对壅塞空化强度影响小。

参考文献:

- [1] Balasundaram B, Pandit A B. Selective Release of Invertase by Hydrodynamic Cavitation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001, 8(3): 251-256.
- [2] Didenko Y T, Suslick K S. The Energy Efficiency of Formation of Photons, Radicals and Ions During Single-Bubble Cavitation[J]. Nature, 2002, 418: 394-397.
- [3] Kim H J, Nguyen D X, Bae J H. The Performance of the Sludge Pretreatment System with Venturi Tubes[J]. Water Science and Technology, 2008, 57(1): 131-137.
- [4] 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, 19(1): 52-55.
Yi Can, Li Gensheng, Zhang Dingguo. Experimental Study on Cavitation Inception of Nozzles with Different Geometries [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(1): 52-55.
- [5] 李根生, 沈忠厚. 常压淹没自激空化射流冲蚀岩石的试验研究[J]. 华东石油学院学报: 自然科学版, 1987, 11(3): 52-60.
Li Gensheng, Shen Zhonghou. Experiment Research of Erosion of Rock by Submerged Self-Excited Cavitation Jet Under Atmospheric Pressure[J]. Journal of East China Petroleum Institute: Natural Science Edition, 1987, 11(3): 52-60.
- [6] 廖振方, 唐川林, 张凤华. 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验研究[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(2): 28-32.

(下转第 108 页)