排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 6 月 June 2016 | 第 34 卷 第 6 期 Vol. 34 No. 6

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0010

喷嘴几何参数对自激吸气脉冲射流性能影响的正交试验

高传昌[1]，黄丹[1]，马建娇[2]，王猛飞[1]，唐林钧[1]
（1. 华北水利水电大学电力学院，河南 郑州 450045；2. 天津中水新华工程规划设计有限公司，天津 300220）


高传昌

摘要：为确定自激吸气脉冲射流喷嘴的几何参数及其交互作用对其性能影响的显著性及重要性次序，运用正交试验的方法，对自激吸气脉冲射流喷嘴的吸气性能和冲击性能进行试验研究，并通过极差分析和方差分析研究了喷嘴面积比、相对腔内面积、相对腔长等因素及其交互作用对装置的吸气性能和冲击性能影响的敏感性. 2 种分析方法得到的结果一致表明，自激吸气脉冲射流喷嘴几何参数对吸气性能影响的主次顺序依次为相对腔长、相对腔内面积、相对腔长与相对腔内面积的交互作用、喷嘴面积比与相对腔内面积间的交互作用、喷嘴面积比；几何参数对喷嘴冲击性能影响的主次依次顺序为喷嘴面积比、相对腔内面积、相对腔长与喷嘴面积比的交互作用、相对腔长，其中前两者对喷嘴冲击性能影响远大于后两者. 验证性试验证实了正交试验结论.

关键词：自激脉冲射流；正交试验；吸气性能；冲击性能；几何参数
中图分类号：S277.9；TP69　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)06-0525-07

高传昌，黄丹，马建娇，等. 喷嘴几何参数对自激吸气脉冲射流性能影响的正交试验[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(6)：525-531.
GAO Chuanchang，HUANG Dan，MA Jianjiao，et al. Orthogonal experimental on effect of geometrical parameters on self-excited inspiration pulsed jet nozzle performance[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2016，34(6)：525-531.(in Chinese)

Orthogonal experimental on effect of geometrical parameters on self-excited inspiration pulsed jet nozzle performance

GAO Chuanchang[1]，*HUANG Dan*[1]，*MA Jianjiao*[2]，*WANG Mengfei*[1]，*TANG Linjun*[1]
(1. School of Electric Power，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou，Henan 450045，China；2. Tianjin Water Xinhua Engineering Planning and Design Co. Ltd.，Tianjin 300220，China)

Abstract：In order to determine the geometrical parameters of the self-excited pulsed jet nozzle and the significance and importance of the order that their interactions affect its performance. The experiment on the inspiratory performance and impact property of the self-excited inspiration pulsed jet nozzle was conducted by the orthogonal experiment method，and the nozzle area ratio，relative oscillation cavity area，relative cavity length and the sensitivity of their interactions to the inspiratory performance and impact property of the device were analyzed by range analysis and variance analysis. The results show that the geometrical parameters that affect the inspiratory performance in descending order are：relative cavity length，relative oscillation cavity area，the interaction between relative oscillation cavity area and relative cavity length，the interaction between nozzle area ratio and relative oscillation cavity area，

收稿日期：2016-01-14；**网络出版时间**：2016-06-12
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160612.1026.008.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51309099)；水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201301024)；华北水利水电大学科研创新团队基金资助项目(2014113)
作者简介：高传昌(1957—)，男，河北邯郸人，教授(gcc@ncwu.edu.cn)，主要从事流体机械工程研究.
黄丹(1991—)，女，河南驻马店人，硕士研究生(follow119104@163.com)，主要从事流体机械工程研究.

nozzle area ratio. The geometrical parameters that affect the impact property in descending order are: nozzle area ratio, relative oscillation cavity area, the interaction between of relative oscillation cavity area and relative cavity length is, relative cavity length among them. The former two contribute is much greater the nozzle impact property than the latter two verifying tests confirmed the conclusions of orthogonal experiment.

Key words: self-excited pulsed jet; orthogonal experiment; inspiration performance; impact property; geometrical parameters

自激吸气脉冲射流喷嘴是在自激脉冲射流喷嘴的振荡腔腔体上设置吸气孔后形成的一种具有优良冲蚀性能的装置[1]，主要用于水库河湖清淤、工业清洗、材料破碎、污水处理及渔业充氧等领域.

近年来，国内外学者主要在自激脉冲射流喷嘴几何参数对吸气性能及脉冲射流的冲蚀[2-4]和冲击特性[5-7]的影响方面进行了大量研究，研究结果均表明，自激振荡脉冲射流可以有效提高装置的瞬时冲击力，其吸气后的冲击性能会进一步提高，参数是影响喷嘴性能的重要因素. 文献[8]就不同结构参数的自激吸气脉冲射流喷嘴吸气量的大小对喷嘴内压力变化和对脉冲射流冲击性能的影响进行了试验研究，研究表明，吸气后可提高喷嘴内的压力波动值和脉冲射流的冲击力. 文献[9]探讨了结构参数中各个单因素对喷嘴打击力的影响，结果表明，在上喷嘴直径一定的情况下，其他结构参数存在最优值可使装置冲击性能达到最优. 文献[10]利用部分析因设计理论分析试验结果，发现工作压力、上下喷嘴直径、腔长等主因子对自激脉冲效果产生重要影响，且它们之间存在一定的交互作用.

目前对于自激吸气脉冲射流喷嘴的研究常采用单因素分析法，即仅改变1个试验自变量，使其他影响因素不变，然后逐个研究试验的影响因素，这种方法费时费力，且未考虑到各个因素间的交互作用，存在一定的局限性. 而正交试验法[11-12]，不仅降低了试验组数，而且还可以得出各因素间的交互作用对试验结果的影响，比较出各因素对试验结果影响的大小. 文中采用正交试验法研究自激吸气脉冲射流喷嘴几何参数对其喷嘴吸气性能和冲击性能的影响，为自激吸气脉冲射流喷嘴设计及工程应用提供技术参数.

1 试验装置

试验装置主要由自激吸气脉冲射流喷嘴与动力系统、管路系统、测量系统、数据采集系统组成，如图1所示.

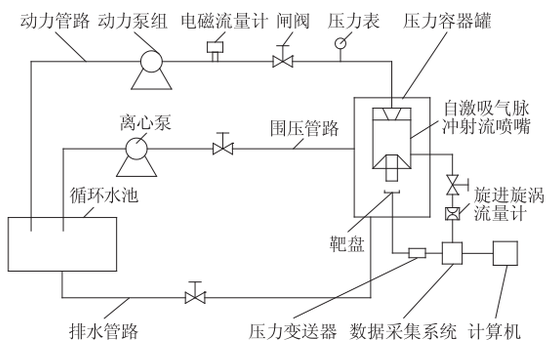


图1 试验系统装置图

Fig. 1 System device of experiment

试验过程：使用单级离心泵从循环水池中抽水，通过围压管路将水注入压力容器罐中，提高压力容器罐中压力达到试验设计值，试验过程中，通过连接压力罐的稳压装置实现围压的稳定. 待压力罐围压稳定后，使用动力泵组从循环水池中抽水，按试验设计要求通过闸阀控制液体流量来控制供给喷嘴压力水的工作压力. 待工作压力稳定后，打开装置的吸气阀，流量计可以测得吸气量，脉冲射流喷嘴将形成的脉冲液气射流喷射至装有压力传感器的靶盘上. 压力信号通过压力变送器和吸气量信号一起由数据采集系统传递给计算机，最后在计算机上进行数据的处理和分析.

2 正交试验方案设计

2.1 试验因素的选择

图2为自激吸气脉冲射流喷嘴结构示意图，喷嘴的几何参数主要包括上喷嘴直径 d_1、下喷嘴直径 d_2、振荡腔腔径 D_c、振荡腔腔长 L_c. 试验过程中保证运行参数（射流压力为2.4 MPa、模拟围压为0.5 MPa、射流靶距为100 mm）不变，由于上喷嘴为最初激发点，运行参数不变时上喷嘴直径直接影响出流口的初始能量，初始能量的改变会对试验结果造成很大的影响，从而无法判断试验结果的变化是基于

几何参数的改变还是初始能量的改变,同时试验涉及的自变量和因变量亦较多,因此文中采用量纲一分析方法,将上喷嘴直径作为各几何参数的基准值,选择喷嘴面积比、相对腔内面积、相对腔长为正交试验的变化因素.

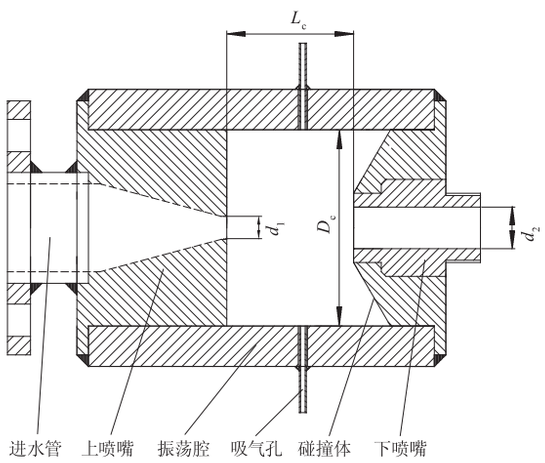


图 2　自激吸气脉冲射流喷嘴示意图

Fig. 2　Schematic diagram of self-excited inspiration pulse jet nozzle

文中选择吸气比率和相对冲击力作为喷嘴吸气性能和冲击性能的评价指标. 将自激吸气脉冲射流喷嘴的几何参数和试验结果皆用量纲一表示,其中 Q_0 为工作流体流量,q 为自吸入气体流量,p_0 为工作压力,p 为靶心冲击力时均值. S_2 为喷嘴面积比,$S_2=(D_c/d_1)^2$,S_c 为相对腔内面积,$S_c=(D_c/d_1)^2$,L_w 为相对腔长,$L_w=L_c/d_1$,q_w 为吸气比率,$q_w=q/Q_0$,p_w 为相对冲击力,$p_w=p/p_0$.

2.2　试验水平的选取

为反映出各因素对喷嘴性能的影响,现选择三水平三因素进行分析,因素 A 为喷嘴面积比 S_2,因素 B 为相对腔内面积 S_c,因素 C 为相对腔长 L_w. 根据以往试验研究对这 3 个因素分别取 3 个水平,如表 1 所示.

表 1　试验因素及水平

Tab. 1　Experimental factors and levels

水平	A	B	C
	S_2	S_c	L_w
1	2.25	50.17	4.58
2	2.78	76.56	5.83
3	3.36	100.00	7.08

2.3　试验设计

表 2 为正交表及结构微数据.

表 2　正交表 $L_{27}(3^{13})$ 及结构参数试验数据

Tab. 2　Orthogonal layout $L_{27}(3^{13})$ and experimental data for structure parameters

因素	A	B	AB	A^2B	C	AC	A^2C	BC	ABC	A^2B^2C	B^2C	A^2BC	AB^2C	q_w	p_w
试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	2.25	50.17	1	1	4.58	1	1	1	1	1	1	1	1	0.469 026	0.154 096
2	2.25	50.17	1	1	5.83	2	2	2	2	2	2	2	2	0.568 143	0.111 014
3	2.25	50.17	1	1	7.08	3	3	3	3	3	3	3	3	0.531 105	0.128 258
4	2.25	76.56	2	2	4.58	1	1	2	2	2	3	3	3	0.375 522	0.176 671
5	2.25	76.56	2	2	5.83	2	2	3	3	3	1	1	1	0.408 345	0.178 688
6	2.25	76.56	2	2	7.08	3	3	1	1	1	2	2	2	0.440 041	0.128 258
7	2.25	100.00	3	3	4.58	1	1	3	3	3	2	2	2	0.394 666	0.170 660
8	2.25	100.00	3	3	5.83	2	2	1	1	1	3	3	3	0.420 085	0.168 452
9	2.25	100.00	3	3	7.08	3	3	2	2	2	1	1	1	0.595 083	0.182 709
10	2.78	50.17	2	3	4.58	2	3	1	2	3	1	2	3	0.432 806	0.122 505
11	2.78	50.17	2	3	5.83	3	1	2	3	1	2	3	1	0.551 194	0.093 374
12	2.78	50.17	2	3	7.08	1	2	3	1	2	3	1	2	0.626 534	0.121 862
13	2.78	76.56	3	1	4.58	2	3	2	3	1	3	1	2	0.362 619	0.146 958
14	2.78	76.56	3	1	5.83	3	1	3	1	2	1	2	3	0.412 062	0.148 892
15	2.78	76.56	3	1	7.08	1	2	1	2	3	2	3	1	0.441 399	0.121 862
16	2.78	100.00	1	2	4.58	2	3	3	1	2	2	3	1	0.386 660	0.139 255
17	2.78	100.00	1	2	5.83	3	1	1	2	3	3	1	2	0.416 012	0.143 566
18	2.78	100.00	1	2	7.08	1	2	2	3	1	1	2	3	0.458 991	0.143 777
19	3.36	50.17	3	2	4.58	3	2	1	3	2	1	3	2	0.441 205	0.098 341
20	3.36	50.17	3	2	5.83	1	3	2	1	3	2	1	3	0.545 639	0.070 976
21	3.36	50.17	3	2	7.08	2	1	3	2	1	3	2	1	0.619 390	0.096 901
22	3.36	76.56	1	3	4.58	3	2	2	1	3	3	2	1	0.338 684	0.122 984
23	3.36	76.56	1	3	5.83	1	3	3	2	1	1	3	2	0.404 635	0.124 294
24	3.36	76.56	1	3	7.08	2	1	1	3	2	2	1	3	0.471 422	0.096 901
25	3.36	100.00	2	1	4.58	3	2	3	2	1	2	1	3	0.377 257	0.116 812
26	3.36	100.00	2	1	5.83	1	3	1	3	2	3	2	1	0.399 437	0.119 185
27	3.36	100.00	2	1	7.08	2	1	2	1	3	1	3	2	0.452 417	0.121 979

文中试验为三因素三水平正交试验，且需考虑了各因素之间的交互作用，现选取 $L_{27}(3^{13})$ 正交表作为试验用表. 根据交互作用将因素 A，B，C 分别安排在试验表第 1，2，5 列，将表 1 中各因素水平排入表 2 中，将 A×B 的交互作用分别安排在第 3 列和第 4 列，将 A×C 之间的交互作用安排在第 6 列和第 7 列，将 B×C 交互作用安排在第 8 列和第 11 列. 第 9，10，12，13 列皆为 A×B×C 三因素的交互作用，试验中拟将其作为误差参考列. 按照正交表 $L_{27}(3^{13})$ 安排试验，将试验结果列入表 2.

3 试验数据分析

3.1 试验的极差分析

正交试验法可以通过极差反映各因素及其交互作用对评价指标影响，极差越大说明该因素对指标的影响越大，极差可以用于判断各因素的主次作用，各因素的极差通过式(1)得到

$$R_i = \max\{J_i\} - \min\{J_i\}, \tag{1}$$

式中：R_i 为极差；J_i 表示每列第 i 个水平对应 9 次试验数据之和.

交互作用的极差为所有相应列的和除以其列数，将结果列入表 3 中.

表 3 极差表

Tab. 3 Table for range

参数	A	B	C	A×B	A×C	B×C	A×B×C
q_w	0.151 9	1.130 3	1.057 9	0.204 6	0.050 2	0.209 4	0.507 3
p_w	0.452 3	0.342 7	0.089 8	0.038 1	0.020 0	0.104 4	0.028 9

同时还可以绘出单因素作用的效应曲线图如图 3 所示.

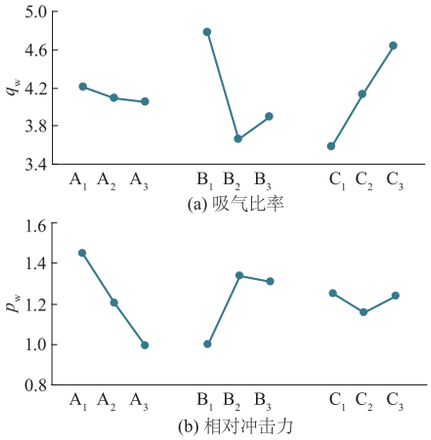


图 3 效应曲线图

Fig. 3 Curves of effect

效应曲线图即以因素的水平为横坐标，以相应水平对应的 9 次试验的结果之和为纵坐标，在图中绘出相应的点，将每个因素对应的 3 个点连起来，并将 3 个因素绘出的图形放到一个坐标系中. 由效应曲线图可直观看出当各因素选取的水平波动时，指标波动的情况，图形波动越大即该因素对试验的影响越大.

根据表 3 及图 3 可以看出，喷嘴面积比对吸气比率影响最小，却对相对冲击力影响最大；相对腔内面积对吸气比率影响最大，对相对冲击力影响较小，喷嘴的相对腔长对吸气比率影响很大，但对相对冲击力影响最小；各因素及各因素交互作用对吸气比率的影响由大小依次为 B(相对腔内面积)，C(相对腔长)，B×C，A×B，A(喷嘴面积比)；各因素对相对冲击力的影响由大到小依次为 A(喷嘴面积比)，B(相对腔内面积)，B×C，C(相对腔长).

3.2 试验的方差分析

极差分析较简单，但没有将因试验条件改变与试验误差引起的数据波动区分开，也没有提供一个标准用于判断所考察的因素作用是否明显，为了进一步排除试验中的误差并对因素显著性进行检测，文中对试验结果进行方差分析.

方差分析需要求得 $F_{因}$ 值，做 F 检验，只有当 $F_{因}$ 大于一个临界值 F_α 时才能说明该因素的影响具有统计学意义，且 $F_{因}$ 值越大说明因素越具有统计学意义. 通常，$F_{因} > F_{0.05}$ 说明该因素具有统计学意义，$F_{因} > F_{0.01}$ 则说明该因素是高度具有统计学意义.

利用公式求出检验统计量 F 值，即

$$S_j = \frac{J_1^2 + J_2^2 + J_3^2}{9} - \frac{(J_1 + J_2 + J_3)^2}{27}, \tag{2}$$

$$f = t - 1, \tag{3}$$

$$\overline{S} = \frac{S}{f}, \tag{4}$$

$$F = \frac{\overline{S}}{\overline{S}_e}, \tag{5}$$

式中：S 为变动平方和；J_i 表示每列第 i 个水平对应 9 次试验数据之和；f 为每列因素的自由度；t 为因素水平数，$t=3$；$\overline{S}$ 为因素的平均变动平方和；$\overline{S}_e$ 为随机误差的平均变动平方和. 交互作用占几列其变动平方和即为这几列之和，同样的，其自由度 f 也是这几列之和.

试验计划将 A×B×C 作为误差参照组，但是实际求得其吸气比率的 4 列数据的变动平方和均不小，故可以认为 A×B×C 三者间对吸气比率也存在

交互作用,经观察发现因素 A×C 的两列变动平方和均较小,可以近似认为其不存在显著交互作用,试验中将其代表的两列作为分析吸气比率的误差列,相对打击力的误差参照列仍选择 A×B×C 代表的 4 列,列出方差分析表 4 和表 5.

表 4　吸气比率方差分析表

Tab. 4　Analytical statement for inspiratory ratio variance

方差来源	S	f	$\bar{S}$	F 值	显著性
A	0.001 39	2	0.000 694	6.511 467	*
B	0.078 53	2	0.039 265	368.376 400	* *
C	0.062 20	2	0.031 102	291.795 900	* *
A×B	0.005 18	4	0.001 294	12.137 980	*
A×C	0.000 43	4	0.000 107		
B×C	0.006 62	4	0.001 655	15.531 300	*
A×B×C	0.015 41	8	0.001 926	18.073 780	* *
S_e	0.000 43	4	0.000 107		
F_α	$F_{0.01}(2,4)=18.00$	$F_{0.01}(4,4)=15.98$	$F_{0.01}(8,4)=14.80$		
	$F_{0.05}(2,4)=6.94$	$F_{0.05}(4,4)=6.39$	$F_{0.05}(8,4)=6.04$		

注:* 为显著;* * 为高度显著.

表 5　相对冲击力方差分析表

Tab. 5　Analytical statement for relative impact variance

方差来源	S	f	$\bar{S}$	F 值	显著性
A	0.011 387	2	0.005 694	209.037	* *
B	0.007 931	2	0.003 966	145.589	* *
C	0.000 533	2	0.000 266	9.777	* *
A×B	0.000 201	4	0.000 050	1.844	
A×C	0.000 052	4	0.000 013	0.476	
B×C	0.001 332	4	0.000 333	12.223	* *
A×B×C	0.000 218	8	0.000 027		
S_e	0.000 218	8	0.000 027		
F_α	$F_{0.01}(2,8)=8.65$	$F_{0.01}(4,8)=7.01$	$F_{0.01}(8,8)=6.03$		
	$F_{0.05}(2,8)=4.46$	$F_{0.05}(4,8)=3.84$	$F_{0.05}(8,8)=3.44$		

由表 4,5 可知,因素 A×C 对吸气性能影响不具有统计学意义,因素 A 和 A×B 对吸气性能有显著影响,因素 B、因素 C 以及 B×C,A×B×C 均对吸气性能有高度显著影响,其中因素 B,C 的显著性远远高于其他几项,可认为其对吸气性能影响极大,各因素及各因素交互作用对吸气比率的影响由大小依次为 B(相对腔内面积),C(相对腔长),B×C,A×B,A(喷嘴面积比);因素 A×C 和 A×B 对喷嘴的冲击性能影响不具有统计学意义,因素 C, B×C,因素 A、因素 B 均对冲击性能有高度显著影响,通过比较表 5 中各因素的 F 值可以看出,因素 A 和因素 B 的 F 值远远大于其他组因素,可以认为其对冲击力影响极大,在以后的试验中需重点考虑. 各因素对相对冲击力的影响由大到小依次为 A(喷嘴面积比),B(相对腔内面积),B×C,C(相对腔长). 方差分析结果验证了极差分析结果.

3.3　试验的交互作用分析

为了对各因素水平进行最优匹配,进一步得到吸气性能最优时喷嘴的几何参数配比,对试验数据进行交互作用分析. 由前面可知对吸气比率影响显著性较大的二阶交互作用为 B×C, A×B;对相对冲击力影响显著性较大的二阶交互作用为 B×C. 分别求出 B×C, A×B 每种组合对应的 3 组试验吸气比率之和,B×C 每种组合对应的 3 组试验的相对冲击力之和,列出交互作用表 6,7.

表 6　吸气比率交互作用

Tab. 6　Interaction for inspiratory ratio

A	B			C		
	$S_2=2.25$	$S_2=2.78$	$S_2=3.36$	$L_w=4.58$	$L_w=5.83$	$L_w=7.08$
$S_c=50.17$	1.568 273	1.610 534	1.606 234	1.343 037	1.664 975	1.777 029
$S_c=76.56$	1.223 908	1.216 080	1.214 741	1.076 825	1.225 041	1.352 863
$S_c=100.00$	1.409 835	1.261 664	1.229 110	1.158 583	1.235 534	1.506 491

表 7　相对冲击力交互作用

Tab. 7　Interaction for relative impact

B	C		
	$L_w=4.58$	$L_w=5.83$	$L_w=7.08$
$S_c=50.17$	0.374 942	0.446 614	0.426 727
$S_c=76.56$	0.275 365	0.451 875	0.431 203
$S_c=100.00$	0.347 021	0.347 021	0.448 464

3.4　数据综合分析

吸气性能最优时,各因素的水平分别为 B_1,C_3,$B_1\times C_3$,$A_2\times B_1$,A_1.

综合考虑选择 $A_2\times B_1\times C_3$ 为吸气性能最优时的结构参数,此结构在选取的 27 组试验中存在,其吸气比率为 27 组试验中最大,符合分析结果.

喷嘴冲击性能最优时,各因素的水平为 A_1,B_2,$B_2\times C_2$($B_3\times C_3$),C_3.

综合考虑选择 $A_1\times B_2\times C_2$ 和 $A_1\times B_3\times C_3$ 为最优结构参数,这 2 个结构在选取的 27 组试验中有出现,其中组合 $A_1\times B_3\times C_3$ 为 27 组试验中靶心冲击力效果最好,组合 $A_1\times B_2\times C_2$ 的冲击力仅仅略低于 $A_1\times B_3\times C_3$,也侧面证明了 B×C 具有很强的交互作用,在以后的试验中要重点考虑其最优组合.

3.5　正交试验结果的验证

因正交试验表所能排的因素水平有限,试验每种因素考虑 3 水平已有 27 组试验,但每个几何参数 3 个水平无法观察出其对喷嘴性能的作用规律,为了验证各几何参数单因素对喷嘴性能的影响,设计增加几组单因素作用试验,来验证正交试验结果,

绘出相应的图如图4所示.

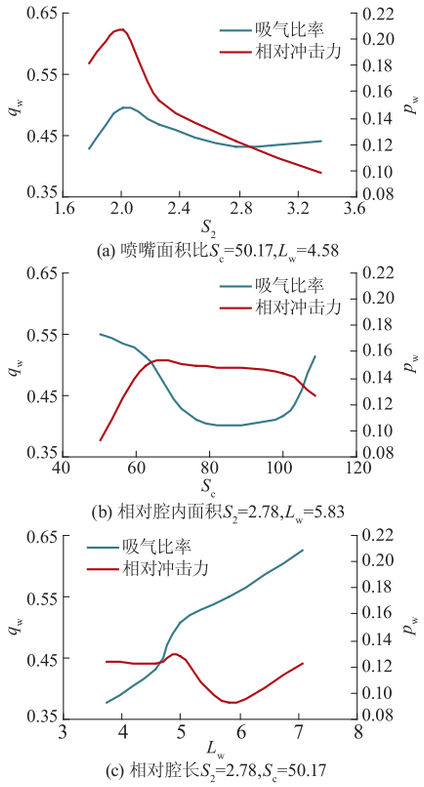


图4 几何参数对喷嘴性能的影响

Fig. 4 Influence of geometrical parameters on nozzle performance

由图4可以看出:

1）喷嘴面积比的变化对喷嘴的吸气比率影响很小,但对喷嘴的相对冲击力影响却很大,无论是相对冲击力还是吸气比率均呈先增大后减小的趋势,在喷嘴面积比约为2时两指标达到最大值,可能由于此时喷嘴的结构振动频率接近射流的频率,出现了谐振的现象,谐振现象可以有效提高喷嘴的吸气性能和冲击性能;喷嘴面积比对喷嘴吸气性能影响不大,这是因为喷嘴的吸气性能最主要和腔内负压涡环有关,即和腔体内结构关系更大一些,但受喷嘴面积比影响不大. 当面积比大于2时,两指标均随面积比增大而下降,这是因为在工作压力不变的情况下喷嘴面积比越大会导致越多的流体未与碰撞体发生碰撞便直接流出,使得这部分流体对腔内负压的产生不再起作用,导致吸气量下降,在流量不变的情况下喷嘴面积增大会导致出流的流速降低,相应的冲击力也会降低.

2）腔内面积比对吸气比率的影响较大,而对冲击力的影响却不大,随着腔内面积比的增大,吸气比率先降低后平稳然后再增大,相对冲击力则先急剧增大然后缓慢降低. 喷嘴的吸气性能主要与腔体内负压的大小有关,而腔内面积的大小直接影响负压涡环的形成. 在其他几何参数确定的情况下,若腔内面积比较小,则腔内空间较小使得腔内的负压相对增强,吸入气体变多. 而相对腔内面积过小,会使涡环没有足够的发展空间,喷嘴的频率特性变差,冲击力较低. 随着腔内面积的增大,空间变大使得腔内的负压相对减弱,吸气量有所降低,但腔内逐渐形成稳定的涡环,使得喷嘴具有稳定的脉冲,出现谐振现象,同时冲击力明显增大. 但随着腔内相对面积进一步增大,喷嘴的谐振现象减弱,冲击力微弱下降,吸气比率急剧下降,而当腔内面积增加到一定程度时,喷嘴再次出现谐振现象,形成频率稳定的脉冲,吸气量明显上升,但因为腔内面积过大,使得液气混流汇集到下喷嘴喷出时的水力损失增大,相对冲击力仍呈下降趋势.

3）相对腔长对吸气比率的影响最大,而对冲击力影响却不大,随相对腔长的增大,吸气比率明显提高,而冲击力变化不明显,仅在相对腔长约为6时出现了波谷. 在试验的范围内,随着相对腔长的增大,腔内涡环的发展空间越来越大,空气涡环变大,使得喷嘴的卷吸作用增强,吸气比率也明显增大. 相对腔长的改变对冲击力的影响程度最小,基本不随之变化,这是因为腔长变长仅仅只是增加了液体流过的腔体长度,对液体出流时流速影响不大,在腔长为6时出现波谷可能是因为当时的几何参数配比对喷嘴冲击力而言是较差的.

4 结 论

文中运用正交试验的方法对自激吸气脉冲射流喷嘴几何参数及各参数间的交互作用对喷嘴吸气性能和冲击性能的影响及影响程度进行了研究,并通过试验验证了正交试验结果,得出以下结论:

1）试验选取的3个喷嘴几何参数对吸气性能影响的主次顺序为相对腔长 L_w、相对腔内面积 S_c、L_w 与 S_c 的交互作用、S_2 与 S_c 间的交互作用、喷嘴面积比 S_2. 其中前三者对吸气性能影响高度具有统计学意义,后两者对吸气性能影响具有统计学意义,3个参数对冲击性能影响的主次顺序为喷嘴面积比 S_2、相对腔内面积 S_c、L_w 与 S_c 的交互作用、相对腔长 L_w,其中前两者对喷嘴冲击性能影响远大于后两者.

2）相对腔内面积 S_c 和相对腔长 L_w 的交互作

用对喷嘴的吸气性能及冲击力都有较强的交互作用,振荡腔腔内结构作为一个整体,其结构的配比直接影响喷嘴的各项性能. 而喷嘴面积比 S_2 和相对腔内面积 S_c 对喷嘴的吸气性能也有较强的影响,在以后的试验设计中也要考虑.

3) 喷嘴的吸气性能主要受喷嘴腔体内部结构的影响,而喷嘴的冲击性能则主要受上下喷嘴面积比的影响,几何参数的交互作用对喷嘴吸气性能的影响更大一些.

参考文献(References)

[1] 高传昌,王松林,刘新阳,等. 自激吸气式脉冲射流喷嘴: 201010556897.8 [P]. 2014 - 06 - 18.

[2] 高传昌,苏泊源,张世斌,等. 深水自激吸气脉冲射流装置冲蚀性能试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2014,35(2):160 - 164.
GAO Chuanchang, SU Boyuan, ZHANG Shibin, et al. Erosion performance of self-excited inspiration pulse jet device in deep water[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2014, 35(2):160 - 164. (in Chinese)

[3] HU Dong, LI Xiaohong, TANG Chuanlin, et al. Analytical and experimental investigations of the pulsed air - water jet[J]. Journal of fluids and structures, 2015, 54(4):88 - 102.

[4] SONG Xianzhi, LI Gensheng, YUAN Jinping, et al. Mechanisms and field test of solution mining by self-resonating cavitating water jets[J]. Petroleum science, 2010, 7(3):385 - 389.

[5] 高传昌,赵礼,刘新阳,等. 淹没条件下自激脉冲射流冲蚀试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1):53 - 56.
GAO Chuanchang, ZHAO Li, LIU Xinyang, et al. Experiment research on erosion of self-excited inspired pulsatile jet in submerged conditions[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(1):53 - 56. (in Chinese)

[6] 唐川林,张晓琪,杨林,等. 利用外加气体改进自激振荡脉冲射流的动态特性[J]. 振动与冲击,2004,23(1):34 - 37.
TANG Chuanlin, ZHANG Xiaoqi, YANG Lin, et al. Improving the dynamic characteristic of self-excited oscillation pulsed het by means of changing gas void fraction[J]. Journal of vibration and shock, 2004, 23(1): 34 - 37. (in Chinese)

[7] 胡东,唐川林,张凤华. 脉冲气液射流冲蚀特性实验分析[J]. 振动与冲击,2013,32(11):141 - 144.
HU Dong, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua. Erosion characteristic of a pulsed air - water jet[J]. Journal of vibration and shock, 2013,32(11):141 - 144. (in Chinese)

[8] 高传昌,王好锋,黄晓亮,等. 淹没条件下不同结构参数的自激吸气式脉冲射流喷嘴压力变化试验研究[J]. 应用力学学报,2012,29(3):330 - 334.
GAO Chuanchang, WANG Haofeng, HUANG Xiaoliang, et al. Experimental research on the pressure changes of self-excited inspiratory pulsed jet nozzle in submerged condition[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2012,29(3):330 - 334. (in Chinese)

[9] 黄晓亮,高传昌,王好锋,等. 结构参数对水下自激脉冲射流装置性能的影响[J]. 人民黄河,2012,34(12):140 - 141.
HUANG Xiaoliang, GAO Chuanchang, WANG Haofeng, et al. Impact of structural parameters on the self-excited pulsed jet device performance[J]. Yellow River,2012,34(12):140 - 141. (in Chinese)

[10] 王健,李江云,关凯,等. 自激喷嘴多频脉冲效果的试验研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(3):458 - 461.
WANG Jian, LI Jiangyun, GUAN Kai, et al. Experimental study about multi-frequency pulse effects of self-excited jet[J]. Journal of engineering thermophysics, 2013,34(3):458 - 461. (in Chinese)

[11] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社,2001.

[12] 杨玉峰,胡寿根,王宗龙. 基于正交实验法的淹没磨料射流冲蚀性能实验研究[J]. 力学季刊,2006,27(2):311 - 316.
YANG Yufeng, HU Shougen, WANG Zonglong. Erosion performance experimental research of submerged abrasive water jet based on orthogonal experimental method[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2006, 27(2):311 - 316. (in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)