



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.018

高传昌, 胡亚州, 刘新阳, 等. 水下自激脉冲射流喷嘴的吸气性能试验研究[J]. 2016, 14(1): 109-113, 118.

GAO Chuangchang, HU Yazhou, LIU Xinyang, et al. Inspiration performance of self excited pulse jet nozzle in submerged condition[J]. 2016, 14(1): 109-113, 118. (in Chinese)

水下自激脉冲射流喷嘴的吸气性能试验研究

高传昌, 胡亚州, 刘新阳, 解克宇, 马文良, 王猛飞

(华北水利水电大学, 郑州 450045)

摘要: 运用自行研制的试验装置对水下不同结构参数的自激吸气脉冲射流喷嘴的吸气性能进行试验, 研究了喷嘴的上下喷嘴直径、腔径和腔长等不同的组合对比对喷嘴吸气量的影响, 以及喷嘴吸气量对喷嘴冲击性能的影响。结果表明: 喷嘴吸气是提高水下自激脉冲射流冲击性能的有效途径, 喷嘴的相对冲击力随着喷嘴吸气量的增加而提高; 在较优的喷嘴结构参数配比范围内, 喷嘴的吸气比率最大; 最佳吸气比率的喷嘴面积比、相对腔长和相对腔径配比范围分别为 3.5~4.0、8~9、11~12.5。

关键词: 喷嘴; 脉冲射流; 吸气; 结构参数; 冲击力; 吸气量

中图分类号: TV 136 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0109-05

Inspiration performance of self excited pulse jet nozzle in submerged condition

GAO Chuangchang, HU Yazhou, LIU Xinyang, XIE Keyu, MA Wenliang, WANG Mengfei

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: This study investigate the self excited inspiration pulse jet nozzle in submerged condition by using the independently developing testing equipment. To analyze the influence of inspiratory capacity on inspiration performance, the structure parameters of nozzle cavity length, lumen diameter, diameter of nozzle and cavity volume to the nozzle under the influence of inspiratory capacity were evaluated. The results indicated that the inspiration is an effective way to improve device performance. The relative impact of the nozzle was enhanced with the increasing of inspiration efficiency; Within the scope of the optimal ratio of nozzle structure parameters, the largest inspiration ratio of nozzle was obtained; The nozzle area ratio, relative cavity length and lumen diameter of optimal inspiration efficiency ranges from 3.5~4.0, 8~9 and 11~12.5, respectively.

Key words: nozzle; pulse jet; inspiration; structure parameters; impact; inspiratory capacity

自激脉冲射流是利用流体力学、流体弹性学等原理发展起来的一种新型高效脉冲射流。依靠射流在合适的喷嘴结构中产生自激振荡, 将连续射流变为自激脉冲射流, 可显著提高射流的冲击力和冲击

效果, 因此自激脉冲射流被认为是一种很有发展前景的射流技术^[1-3]。

影响自激脉冲射流冲击效果的因素主要包括自激脉冲射流喷嘴的结构参数和运行参数。近年来,

收稿日期: 2015-07-05 修回日期: 2015-12-20 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1656.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51309099); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201085); 华北水利水电大学大学生创新创业计划项目(HSCX2014115)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51309099); National Public Welfare Foundation of the Ministry of Water Resources of China(201201085); North China university of water conservancy and hydropower college students' innovative undertaking plan project(HSCX2014115)

作者简介: 高传昌(1957-), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士, 主要从事流体力学及工程方面的研究。E-mail: gcc@ncwu.edu.cn.

通讯作者: 胡亚州(1990-), 男, 河南商丘人, 主要从事流体力学及工程方面的研究。E-mail: asiahu1990@163.com

国内外学者主要对高压小流量和非淹没低压大流量自激脉冲射流喷嘴的结构参数、运行参数和脉冲产生机理以及实际应用等方面进行了大量理论和试验研究,但多集中于清洗、切割、破岩、石油钻探和材料破碎等工程应用领域^[4-14],而对适用于水库泥沙淤积处理等方面的低压大流量自激脉冲射流装置研究较少。

为了解决水库泥沙淤积这一实际工程问题,笔者在自激脉冲射流喷嘴的腔室上适当开孔,使空气自吸入到腔室内,提高喷嘴的冲击性能,从而达到提高水库泥沙淤积处理的效果,于是就形成了水下低压大流量自激吸气脉冲射流喷嘴(已获国家发明专利)。通过对水下低压大流量自激吸气脉冲射流喷嘴的冲击性能和冲蚀效果试验研究发现^[15-16],喷嘴的冲击性能和冲蚀效果与喷嘴的吸气量多少有关,而喷嘴吸气量的多少又与喷嘴的结构参数和运行参数有关。为此,本文采用量纲归一的分析方法就不同水深下的低压大流量自激吸气脉冲射流喷嘴吸气性能与其结构参数之间的关系进行研究,寻求合理的配比关系,以期提高脉冲液气射流泵的冲蚀效果。

1 试验装置与试验内容

1.1 试验装置

试验装置主要由动力泵组、电磁流量计、压力表、单级离心泵、自激吸气脉冲射流喷嘴、旋进旋涡流量计、循环水池、压力容器罐、靶盘、压力变送器和数据采集系统等组成,见图 1。

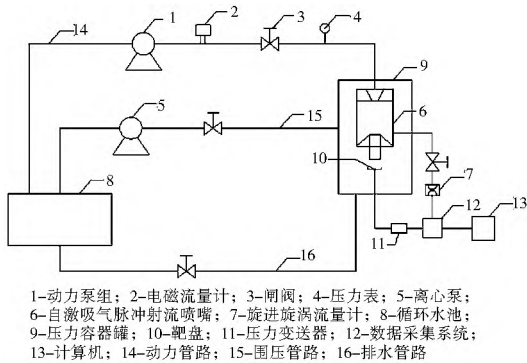


图 1 自激脉冲射流试验系统装置

Fig. 1 The system device of the self excited pulse jet experiment

试验过程如下:利用离心泵 5 从循环水池 8 中抽水,注入压力容器罐 9 内;运用稳压设备模拟不同的水深环境,在围压稳定后,启动动力泵组 1 从循环水池 8 中抽水;按试验设计要求通过闸阀 3 控制工作压力,通过动力管路 14 输送至脉冲射流喷嘴 6 内,从而形成脉冲液气射流垂直喷射至靶盘 10 上;用旋进旋涡流量计 7 测得吸气量,并与压力变送器

一起将相关信号传输给数据采集系统,通过计算机进行数据存储及分析。

1.2 试验内容与无量纲参数

本试验选用不同结构参数(见表 1)的自激吸气脉冲射流喷嘴(见图 2),布置在可模拟不同水深的压力容器罐(见图 3)内,开展自激吸气脉冲射流喷嘴吸气性能试验,得到相应的吸气量及射流冲击力。运用量纲归一的分析方法研究不同淹没条件下吸气量对冲击力的影响,以及自激吸气脉冲射流喷嘴不同结构参数对吸气量的影响。

表 1 自激吸气脉冲射流喷嘴结构无量纲参数

Tab. 1 Structure non dimensional parameter of self excited inspiration pulse jet nozzle

参数类别	名称	选取范围
结构参数	上喷嘴出口直径 d_1 /mm	
	下喷嘴出口直径 d_2 /mm	
	腔径 D_c /mm	
	腔长 L_c /mm	
	喷嘴面积比 $S_w = (d_2/d_1)^2$	2.5~ 4.9
	相对腔径 $D_w = D_c/d_1$	8.5~ 12.5
	相对腔长 $L_w = L_c/d_1$	4.0~ 9.5
运行参数	特征面积比 $T_w = 4D_c \times L_c \pi d_1^2$	
	自吸入气体流量 $Q_g / (m^3 \cdot h^{-1})$	
	工作流体流量 $Q_1 / (m^3 \cdot h^{-1})$	
	靶心冲击力时均值 $P/M Pa$	
	工作压力 P_0 / MPa	
	吸气比率 $Q = Q_g / Q_1$	
	相对冲击力 $F_w = P / P_0$	

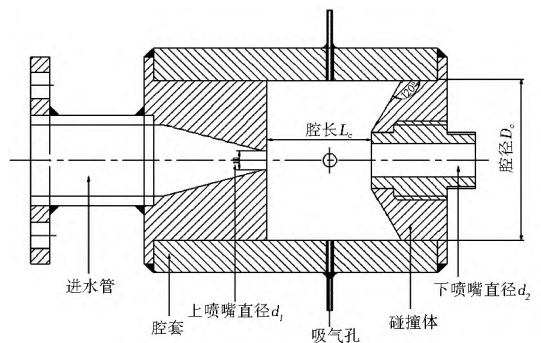


图 2 自激吸气脉冲射流喷嘴

Fig. 2 The nozzle of the self excited inspiration pulse jet

自激吸气脉冲射流喷嘴结构参数与运行参数均采用无量纲数表示,见表 1。

2 试验结果及分析

2.1 吸气量对喷嘴冲击性能的影响

图 4 给出了不同喷嘴面积比的喷嘴相对冲击力

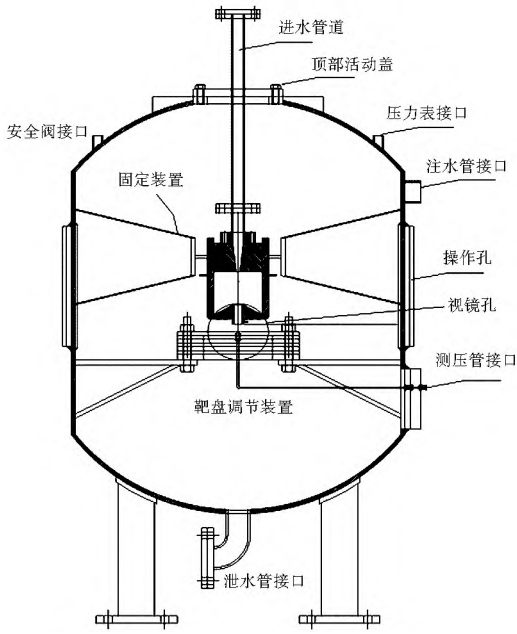


图3 压力容器
Fig. 3 The pressure vessel

在不同围压下(水深)随吸气量变化的曲线(围压 0.1~0.6 MPa, 模拟水深 10~60 m)。由图 4 可知,在不同喷嘴面积比和不同围压下的喷嘴相对冲击力随着吸气量的增加而逐渐上升,而喷嘴相对冲击力随吸气量的变化受围压影响较大。小围压下的相对冲击力随吸气量变化的上升值高于大围压下的上升值,这是由于下喷嘴出口的液气脉冲射流受到了围压的影响,围压越高,受到的阻力就越大,射流速度衰减的就越快,达到相同靶距的冲击面时射流的冲击力就越小。在相同围压下,喷嘴面积比对喷嘴相对冲击力随吸气量的变化影响较小,大面积比的喷嘴相对冲击力随吸气量的上升值略小于小面积比的上升值。由文献[17]可知,喷嘴吸气量的多少影响液气脉冲射流的频率,而与不同面积比喷嘴结构的固有频率不协调,致使液气脉冲射流的冲击力受到了影响。

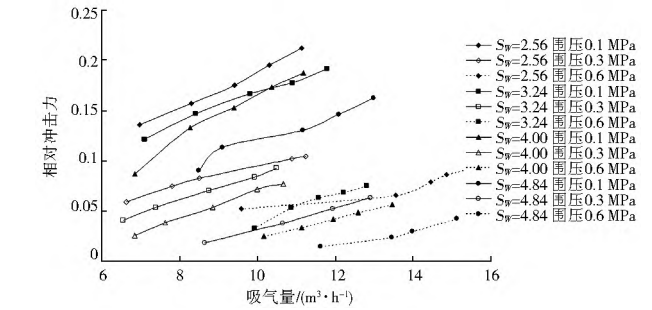
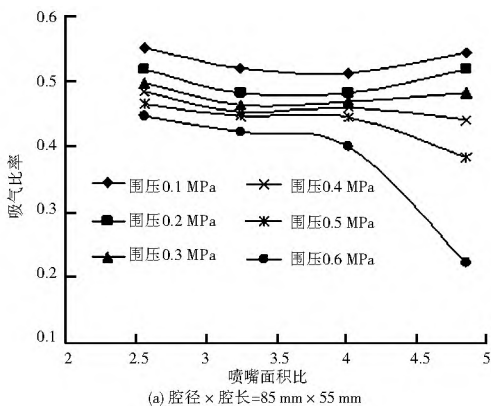


图4 不同围压下吸气量对相对冲击力的影响

Fig. 4 The impact of inspiratory capacity on the relative impact under different water pressure

2.2 喷嘴面积比对喷嘴吸气量的影响

图 5 给出了相同工作压力(上喷嘴流速)下两种腔室结构的喷嘴在不同围压下的吸气比率随喷嘴面积比的变化曲线。由图 5 可见,在围压 0.1~0.3 MPa 下,两种腔室结构的喷嘴吸气比率随喷嘴面积比的变化略有不同,但在 0.4~0.6 MPa 围压下,喷嘴的吸气比率随喷嘴面积比的变化趋势基本一致。由文献[18]可知,在低围压下,相同工作压力对不同结构参数的自激吸气脉冲射流喷嘴内的压力变化规律基本相同,吸气量变化不大,而在高围压下,喷嘴内的压力变化规律不同,吸气量变化较大。因此,在围压小于 0.3 MPa 时,喷嘴吸气量随面积比的增加而增大,在围压大于等于 0.4 MPa 时,喷嘴的吸气量随面积比的增加出现了峰值,喷嘴面积比在 3.0~4.0 时,吸气量最大。在围压 0.6 MPa 和喷嘴面积比为 5 时,喷嘴吸气量下降很快。喷嘴面积比为 5 时,下喷嘴的直径是上喷嘴出口直径的 2 倍多,当上喷嘴提供的流量相同时,下喷嘴出口流速小,此时高围压通过下喷嘴对喷嘴内压力分布影响较大,负压脉动很小,喷嘴的吸气量大幅度减少。因此,在大面积比和高围压下,喷嘴吸气量就出现了骤降。

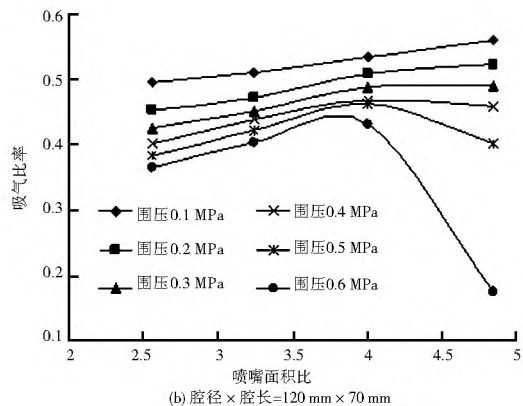


图5 不同围压下喷嘴面积比对吸气比率的影响

Fig. 5 The impact of nozzle area ratio on the inspiration ratio under different water pressure

2.3 腔长对喷嘴吸气量的影响

不同面积比下的喷嘴吸气比率在不同围压下随相对腔长变化的曲线见图 6。在喷嘴面积比为 2.56 和 3.24 时,不同围压下的喷嘴吸气比率随相对腔长的变化出现一个峰值,而在喷嘴面积比为 4.0 和

4.84 时,喷嘴吸气比率随相对腔长的变化出现了两个峰值,但喷嘴吸气比率最大的相对腔长的范围均为 8~9,相对腔长为 8.5 时,喷嘴吸气量达到最大值。围压仅对喷嘴吸气比率随相对腔长变化的上升值的大小有影响,小围压上升值高于大围压上升值。

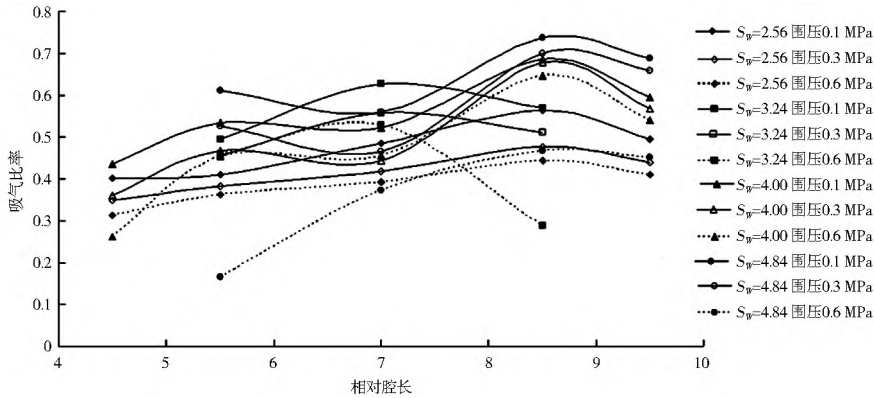


图 6 不同围压下相对腔长对吸气比率的影响

Fig. 6 The impact of relative cavity length on the inspiration ratio under different water pressure

2.4 腔径对喷嘴吸气量的影响

图 7 为不同围压下的喷嘴吸气比率在不同工作压力下随相对腔径的变化曲线。由图 7 可见,不同围压下的高工作压力的喷嘴吸气比率随相对腔径的变化值高于低工作压力下的变化值,但随相对腔径的变化趋势基本一致。相对腔径为 8.5 和 12 时,喷嘴吸气比率最大,在相对腔径为 10.5 时,喷嘴吸气比率最小,最佳吸气比率的相对腔径范围是 8~9 和 11~12。由图 7 可以看出,不同围

压下的喷嘴吸气比率随腔径变化的起始吸气工作压力不同,围压越高,起始吸气工作压力越高,反之则低。喷嘴腔室内负压脉动的形成是由工作压力引起的,在围压不变时,工作压力越高,喷嘴腔室内的负压脉动幅值越大,吸气量也越大;当工作压力不变,围压越高,喷嘴腔室内的负压脉动就越小,甚至无负压脉动。因此,围压越高,喷嘴腔室内形成负压脉动要求的工作压力越高,也就是需要起始吸气工作压力越高。

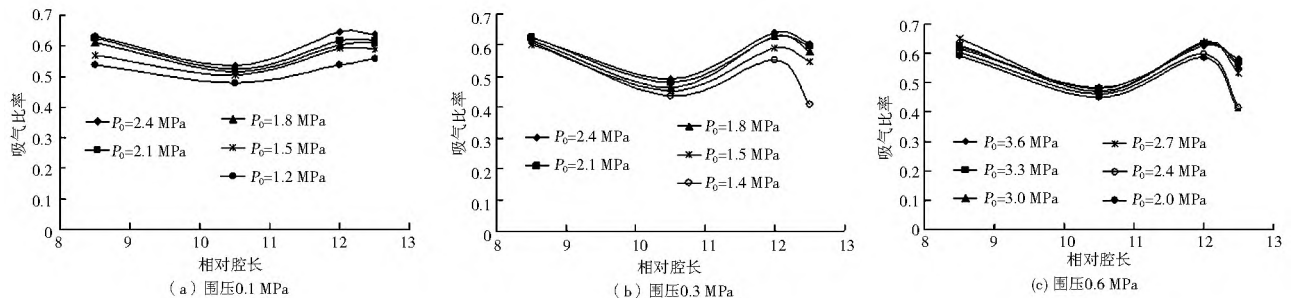


图 7 不同工作压力下相对腔径对吸气比率的影响

Fig. 7 The impact of relative Lumen diameter on the inspiration ratio under different working pressure

2.5 喷嘴特征面积比对吸气量的影响

工作压力和上喷嘴直径影响着来流大小及来流扩散角,与腔径、腔长的大小共同影响腔体内负压脉动的形成,故三者配比后对吸气比率的影响是非常关键的。运用无量纲参数特征面积比来考察喷嘴结构参数对负压脉动的形成规律,分析喷嘴的特征面积比对吸气比率的影响规律,为进一步优化喷嘴结构参数、提升喷嘴冲击性能提供依据。图 8 给出了某一喷嘴面积比的喷嘴吸气比率

在不同工作压力下随特征面积比变化的曲线。由图 8 可知,特征面积比对吸气比率的影响较为显著,吸气比率曲线随特征面积比变化的整体趋势与相对腔径和腔长对吸气比率的影响规律类似。吸气比率随特征面积比的变化先逐渐增大后减小,减小的幅值较大,然后又逐渐波动上升,但当特征面积比过大时,吸气比率又开始迅速下降。吸气比率随特征面积比波动上升过程也说明了腔长、腔径和上喷嘴的配比对吸气量的影响是比较

显著的,单方面改变一个因素来改变特征面积比对吸气比率的影响是片面的,在选出较佳相对特

征面积比的基础上对不同腔径、腔长、上喷嘴的合理组合也是影响吸气比率的关键因素。

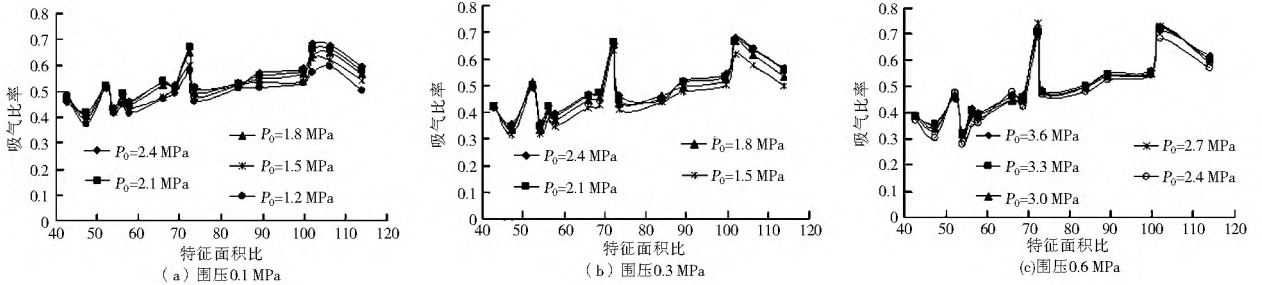


图8 不同工作压力下特征面积比对吸气比率的影响

Fig. 8 The impact of specific area ratio on the inspiration ratio under different working pressure

综合分析不同围压及工作压力下特征面积比对喷嘴吸气比率影响规律可得,喷嘴最佳吸气比率的特征面积比范围为70、100~110。

3 结论

(1) 在不同喷嘴面积比和不同围压下的喷嘴相对冲击力随着吸气量的增加而逐渐上升,而喷嘴相对冲击力随吸气量的变化受围压影响较大。小围压下的相对冲击力随吸气量变化的上升值高于大围压下的上升值,大面积比的喷嘴相对冲击力随吸气量的上升值小于小面积比的上升值。

(2) 在围压小于0.3 MPa时,喷嘴吸气量随面积比的增加而增大,而在大面积比和高围压下,喷嘴吸气量会出现骤降。在围压大于等于0.4 MPa,喷嘴面积比在3.0~4.0时,吸气量达到最大,可作为自激吸气脉冲射流喷嘴设计的依据。

(3) 相对腔径、腔长对喷嘴的吸气比率均有影响,并确定了最佳吸气比率的相对腔径、腔长范围;不同围压下的喷嘴吸气比率随腔径变化的起始吸气工作压力不同。

(4) 不同腔径、腔长、上喷嘴的合理组合是影响吸气比率的关键因素之一。无量纲参数特征面积比对吸气比率的影响较为显著,存在最佳吸气比率的特征面积比范围为70、100~110。

本文通过对自激吸气脉冲射流喷嘴的试验研究,初步得到了各结构参数吸气量较佳的配比范围,但对喷嘴腔室内负压脉动的形成机理还不太清楚,需要后期进一步研究。

参考文献(References):

[1] 唐川林,廖振方. 自激振荡脉冲射流装置的理论分析和实验研究[J]. 煤炭学报, 1989, 14(1): 90-100. (TANG Chuang lin, LIAO Zhen fang. Theoretical analysis and experimental study a self excited oscillation pulsed jet device[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(1): 90-100. (in Chinese))

[2] 唐川林,胡东,裴江红. 自激振荡脉冲射流动态特性的实验研究[J]. 水利水电技术, 2006, 37(12): 71-74. (TANG Chuang lin, HU Dong, PEI Jiang hong. Experimental research on dynamic characteristics of the self excited oscillation pulsed water jet [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(12): 71-74. (in Chinese))

[3] 李君,高传昌. 自激脉冲射流技术研究与应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 187-191. (LI Jun, GAO Chuang chang. Research and application progress of self excited pulsed jet technology[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 187-191. (in Chinese))

[4] 李晓红,杨林,王建生,等. 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, WANG Jian sheng, et al. 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))

[5] 廖振方,唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(2): 24-27. (LIAO Zhen fang, TANG Chuang lin. Theory of the self excited oscillation pulsed Jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2): 24-27. (in Chinese))

[6] 廖振方,唐川林,张风华. 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. (LIAO Zhen fang, TANG Chuang lin, ZHANG Feng hua. Experiments of the self excited oscillation pulsed jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2): 28-32. (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 Le qin, WANG Xun ming, XU Ru liang, 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] 白志华,曹林卫. 脉冲水射流破岩的数值模拟与分析[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2009, 23(2): 31-35. (BAI Zhi hua, CAO Lin wei. Numerical simulation and analysis of rock breaking under pulse water jet[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2009, 23(2): 31-35. (in Chinese))

(下转第118页)

- dams[J]. Dam and Safety, 2006(3): 50-52. (in Chinese)
- [9] 陈洋, 王立彬, 王旭东. 病险土石坝除险加固防渗方案的比选[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(2): 136-139. (CHEN Yang, WANG Li bin, WANG Xu dong. Comparison of reinforcement anti seepage program in the dangerous earth rock dam[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(2): 136-139. (in Chinese))
- [10] 江沅, 沈振中, 邱乾勇. 三维非稳定饱和和非饱和渗流有限元法改进及验证[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 54-56. (JIANG Huan, SHEN Zhen zhong, QIU Qian yong. Improvement of finite element method and its validation in 3d unstable saturated/unsaturated seepage[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 54-56. (in Chinese))
- [11] 徐克, 赵云胜, 张强. 尾矿库溃坝后果数值分析[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(10): 28-30. (XU Ke, ZHAO Yun sheng, ZHANG Qiang. Numerical analysis for the tailings dam break[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(10): 28-30. (in Chinese))
- [12] 王洪德, 李航. 尾矿库初期坝排渗能力对渗流场浸润线影响[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2014, 33(4): 443-446. (WANG Hong de, LI Hang. Effect of tailing pond starter dam drainage capacity on seepage field saturation line[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2014, 33(4): 443-446. (in Chinese))
- [13] 蒋磊, 沈振中, 涂晓霞. 复杂土坝的渗流安全分析评价[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(2): 81-83. (JIANG Lei, SHEN Zhen zhong, TU Xiao xia. Analysis and assessment of seepage safety of complicated earth dam[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(2): 81-83. (in Chinese))
- [14] 叶合欣, 陈建生. 渗流计算中浸润线拟合时应注意的一个问题[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(5): 63-65. (YE He xin, CHEN Jian sheng. A noticeable problem in saturation line fitting for seepage calculation[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(5): 63-65. (in Chinese))
- [15] 曹伟, 徐卫亚, 孟庆祥. 库水位下降时库岸边坡浸润线变化规律与稳定性研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2014, 36(6): 15-19. (CAO Wei, XU Wei ya, MENG Qing xiang. Variation rule of phreatic line and stability analysis of reservoir slope under draw down conditions[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2014, 36(6): 15-19. (in Chinese))

(上接第 113 页)

- [9] 胡东, 唐川林, 张凤华, 等. 脉冲气液射流冲刷特性实验分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 141-144. (HU Dong, TANG Chuan lin, ZHANG Feng hua, et al. Erosion characteristic of a pulsed air water jet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(11): 141-144. (in Chinese))
- [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(1): 83-87. (MA Dong jun, LI Gen sheng, JIN Lei, 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(1): 83-87. (in Chinese))
- [11] Gumkowski S. Modeling and experimental investigation of the hydraulic jump in liquid film formed by an impinging two phase air water Jet[J]. Heat Transfer Engineering, 2008, 29(9): 816-821.
- [12] 唐川林, 王晓明, 胡东, 等. 自振脉冲喷嘴中异形结构对射流振荡频率的影响[J]. 矿山机械, 2015(01): 15-20. (TANG Chuan lin, WANG Xiao ming, HU Dong, et al. Influence of special outlet self exciting oscillation pulsed nozzle on oscillation frequency[J]. Mining & Processing Equipment, 2015(01): 15-20. (in Chinese))
- [13] 秦春, 陈小元, 李禹, 等. 水力脉冲射流钻井提速技术在江苏油田的应用[J]. 石油机械, 2015(05): 17-21. (QIN Chun, CHEN Xiao yuan, LI Yu, et al. Applications of hydraulic pulse jet technology in Jiangsu Oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2015(05): 17-21. (in Chinese))
- [14] 张阳, 孙四清, 张俭, 等. 水射流割缝增透技术研究进展[J]. 煤矿机械, 2014(05): 7-9. (ZHANG Yang, SUN Si qing, ZHANG Jian, et al. Research progress of water jet slotting technology for permeability enhancement[J]. Coal Mine Machinery, 2014(05): 7-9. (in Chinese))
- [15] 刘新阳, 高传昌, 赵礼, 等. 自激励冲淹没水射流装置性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 297-301. (LIU Xin yang, GAO Chuan chang, ZHAO Li, et al. Experimental study on performance of self excitation pulse submerged water jet equipment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 297-301. (in Chinese))
- [16] 高传昌, 苏泊源, 张世斌, 等. 深水自激吸气脉冲射流装置冲刷性能试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2014, 35(2): 160-164. (GAO Chuan chang, SU Bo yuan, ZHANG Shi bin, 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))
- [17] 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 Chuan lin, ZHANG Xiao qi, YANG Lin, et al. Improving the dynamic characteristic of self excited oscillation pulsed jet by means of changing gas void fraction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(1): 34-37. (in Chinese))
- [18] 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, 358. (GAO Chuan chang, WANG Hao feng, HUANG Xiao liang, 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, 358. (in Chinese))