



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.019

肖钧升, 沈振中, 于洋. 心墙坝浸润线简化计算方法[J]. 2016, 14(1): 114-118.

XIAO Jun sheng, SHEN Zhen zhong, YU Yang. Simplified method for core dam saturation line calculation [J]. 2016, 14(1): 114-118. (in Chinese)

心墙坝浸润线简化计算方法

肖钧升^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 于洋²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 通过理论分析和数值计算, 在考虑坝体与防渗墙的相对渗透系数关系的基础上, 提出了估算心墙坝坝体浸润线的一种简化计算方法, 给出了浸润线位置的拟合公式。以白鸭山水库大坝为例, 将该简化方法与有限元法的计算结果进行对比, 表明该简化方法合理、可行。这一简化计算方法可大大减少中小型水库大坝在进行除险加固方案比选时的计算工作量。

关键词: 土石坝; 渗流特性; 除险加固; 相对渗透系数; 心墙坝; 坝体浸润线

中图分类号: TV 223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0114-05

Simplified method for core dam saturation line calculation

XIAO Jun sheng^{1,2}, SHEN Zhen zhong^{1,2}, YU Yang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The saturation line position is one of the main bases for flow characteristics evaluation of earth rock dams, which must be calculated before the comparing and selecting the appropriate anti-seepage reinforcement program of dangerous earth rock dam. Considering the relationship between the relative permeability coefficient of the dam and the cut-off wall, a simplified calculation method was proposed to estimate the saturation line of the core dam by theoretical analysis and numerical calculation. A fitting formulation was developed to calculate the position of the saturation lines. The simplified calculation methods proved to be reasonable when comparing with the results of finite element methods based on the dam of Baiyashan Reservoir. The simplified calculation method can significantly reduce the computational workload when comparing and selecting the reinforcement program of small and medium sized reservoir dams.

Key words: earth rock dam; flow characteristics; danger control and reinforcement; relative permeability coefficient; core dam; dam saturation line

目前中国已建成水库大坝 9 万余座, 其中土石坝^[1]约占 93%。近年来, 许多中小型水库陆续出现了不同程度的病险问题^[2], 在其进行防渗除险加固处理^[3]时, 有约 1/3 以上的病险土石坝采取了混凝土防渗墙^[4]、劈裂灌浆^[5]、高喷防渗墙等垂直防渗加

固^[6]措施。因各水库加固措施及加固效果不同, 故而对防渗加固前后坝体浸润线位置进行分析和总结, 对今后大坝的加固及设计, 安全鉴定具有重要的指导作用^[7]。

在进行水库大坝除险加固方案比选^[8]时, 采用

收稿日期: 2015-03-16 修回日期: 2015-05-25 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1657.021.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51179062)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51179062)

作者简介: 肖钧升(1991-), 男, 江苏南通人, 主要从事水工结构方面研究。E-mail: junshengxiao@163.com

通讯作者: 沈振中(1968-), 男, 江苏吴江人, 教授、博导, 主要从事水工结构工程和岩土工程研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

有限元法计算坝体浸润线位置时需要建立相应的有限元模型, 显得不够方便, 水力学计算公式^[9]具有一定的适用范围, 精度有时不能满足要求, 因此对坝体除险加固前后浸润线位置^[10]进行量化分析并确定浸润线位置的数值方程可以更加方便快捷地对土石坝的渗流安全稳定^[11]进行评价分析, 从而初步确定水库大坝的除险加固方案。本文针对采用劈裂灌浆或者防渗墙加固的一般心墙坝, 在提出经验公式的基础上, 考虑坝体与防渗墙的相对渗透系数关系, 给出浸润线位置的拟合公式^[12]。由于白鸭山水库大坝为比较典型的采用劈裂灌浆进行除险加固的心墙坝, 故利用其在除险加固前后的浸润线位置对该拟合公式进行了复核, 以验证该公式的合理性及普遍适用性。

1 公式选取

研究表明^[13], 大坝浸润线性态的变化过程具有和 S 型曲线类似的特征。利用数学工具 Origin 对各类 S 曲线进行研究, 发现 Growth/Sigmoidal 模型与浸润线位置的变化过程较为吻合, 其表达式为:

$$y = A_1 + (A_2 - A_1) \left[\frac{p}{1 + 10^{(\log x_{01} - x)/h_1}} + \frac{1-p}{1 + 10^{(\log x_{02} - x)/h_2}} \right] \quad (1)$$

式中: x 为自变量; y 为因变量; A_1 、 A_2 、 p 为与坝体填筑材料和心墙的渗透系数比值有关的函数; $\log x_{01}$ 、 $\log x_{02}$ 、 h_1 、 h_2 为常数。

根据浸润线位置的变化特点, 将 Growth/Sigmoidal 公式改进为:

$$y = H - A_1 + (A_1 - A_2) \left[\frac{p}{1 + 10^{(\log x_{01} - x)/h_1}} + \frac{1-p}{1 + 10^{(\log x_{02} - x)/h_2}} \right] \quad (2)$$

式中: x 为横向坐标(在坝轴线处 $x = 0$, 上游指向下游为正方向); y 为相应点的浸润线高程; H 为坝体上游水位高程; A_1 、 A_2 、 p 为与坝体填筑材料和心墙的渗透系数比值有关的函数; $\log x_{01}$ 、 $\log x_{02}$ 、 h_1 、 h_2 为常数。

现对一般的心墙坝典型断面进行计算分析。假想心墙坝加固前后典型断面见图 1, 加固措施采用劈裂灌浆或防渗墙加固。

心墙坝在计算时建立如下的坐标系: 以大坝坝顶中点为坐标原点, 取 X 轴为上下游方向, 上游指向下游为正; Y 轴为垂直方向, 向上为正, 与高程一致, 坝顶高程取为 36.3 m。上游水位定为 32 m。

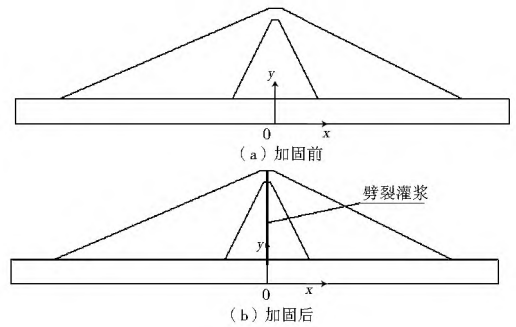


图 1 典型断面结构

Fig. 1 The typical cross sectional structure

由于心墙坝在除险加固前后最直接的变化是加固后心墙的渗透系数远小于其周围材料的渗透系数, 且加固之前原始心墙已失效, 因此可近似认为浸润线的降低与坝体填筑材料和心墙的相对渗透系数的比值 m 有很大关系。现分别对 m 为 10、50、100、200 的情况进行研究, 有限元法能够较为精确地计算坝体浸润线位置(图 2), 故依据有限元计算所得到的浸润线位置来拟合式(2)中的参数, 拟合得到参数 $\log x_{01} = 0.0803$, $\log x_{02} = 31.775$, $h_1 = 6.06054$, $h_2 = 0.02101$, A_1 、 A_2 、 p 分别由式(3)~式(5)求得。四组 m 参数对应的拟合曲线见图 2, 曲线拟合 R^2 分别为 0.9980、0.9955、0.9943、0.9950, 可见拟合效果较好。

$$A_1 = \frac{1}{-0.19552 - 0.00123m} \quad (3)$$

$$A_2 = 28.80885 + 6.44628 \exp\left[-\frac{m}{114.58878}\right] + 2.89113 \exp\left[-\frac{m}{4.46062}\right] \quad (4)$$

$$p = 0.59161 - 0.14704 \exp\left[-\frac{m}{0.4547}\right] - 0.45474 \exp\left[-\frac{m}{18.013118}\right] \quad (5)$$

2 实例分析

白鸭山水库位于信阳市新县箭厂河乡、长江一级支流倒水河上, 是一座以防洪、灌溉功能为主, 兼水产品养殖等综合利用的小(1)型水库。2009 年对白鸭山水库进行安全评价, 发现其主要问题为: 坝体防渗心墙高程不满足规范设计要求; 大坝心墙填筑材料不合格, 填筑质量差, 干密度大部分未达到设计要求; 大坝心墙填筑质量差, 渗透系数偏大, 渗流安全性为 C 级, 不满足设计要求。因此鉴定白鸭山水库为三类坝。据此, 对白鸭山水库进行了除险加固初步设计, 采用以劈裂灌浆和水泥土搅拌桩防渗墙接高为主的防渗加固体系。加固前后坝体典型断面

结构图见图 3。通过对坝体典型断面和地质资料的分析,建立典型断面的有限元模型,并由材料特性区分出坝体、坝基岩体等材料分区,取顺河流方向为 X

轴,下游为正向;取垂直方向为 Y 轴,向上为正向,坐标与高程一致。坝基岩体和坝体各主要料区渗透参数见表 1。

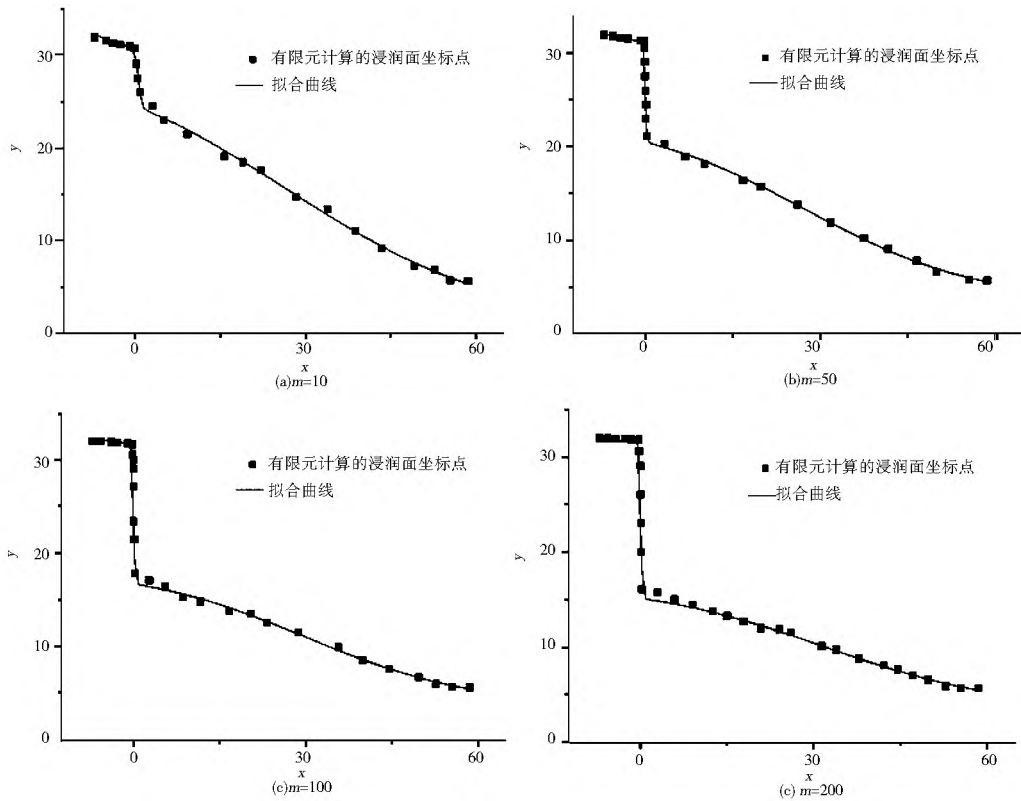


图 2 不同相对渗透系数比值下浸润线拟合曲线

Fig. 2 saturation line fitting curve under different permeability ratios

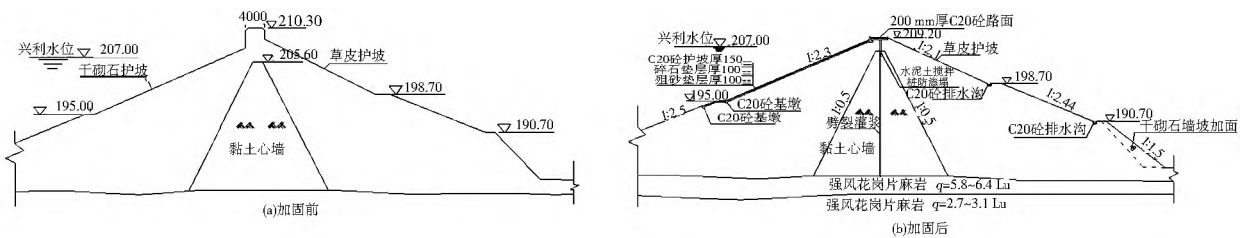


图 3 典型断面加固前后结构

Fig. 3 The typical cross sectional structure before and after reinforcement

表 1 坝体、坝基各料区渗透参数

Tab. 1 Permeability coefficients of the dam and foundation

土料号	岩土名称	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	花岗片麻岩(弱风化)	1.00×10^{-5}
2	花岗片麻岩(强风化)	3.50×10^{-5}
3	劈裂灌浆心墙	1.00×10^{-6}
4	坝体填筑料	4.00×10^{-4}
5	干砌石培坡	1.00×10^{-1}
6	代替料	1.00×10^{-3}

通过有限元计算分析,正常蓄水位情况下白鸭山水库大坝在加固前后的渗流场分别见图 4 和图 5。

白鸭山水库大坝属于典型的采用劈裂灌浆进行除险加固的心墙坝,故可采用上述拟合公式进行验

证。在正常蓄水位情况下,劈裂灌浆处周围坝体填筑材料的渗透系数与心墙渗透系数的比值 m 在除险加固前后分别为 1 和 400,上游水位高程为 207.00 m。利用改进的公式,加固前后坝体的浸润线方程分别为式(6)和式(7),拟合曲线见图 6。曲线拟合 R^2 分别为 0.9976 和 0.9968,拟合效果较好。

$$y = 207 + 5.082559 - 42.59237 \times$$

$$\left[\frac{0.01045}{1 + 10^{6.06054(0.0803 - x)}} + \frac{0.98955}{1 + 10^{0.02101(31.775 - x)}} \right] \quad (6)$$

$$y = 207 + 1.4545 - 30.45982 \times$$

$$\left[\frac{0.57627}{1 + 10^{6.06054(0.0803 - x)}} + \frac{0.98955}{1 + 10^{0.02101(31.775 - x)}} \right] \quad (7)$$

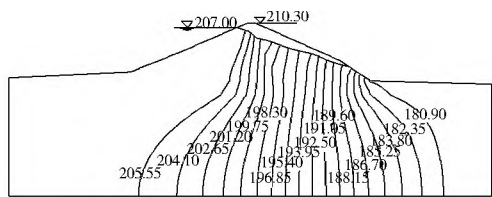


图4 正常蓄水位工况下典型断面加固前渗流等势线分布

Fig. 4 Seepage equipotential line distribution of the typical cross section before reinforcement under the normal water level

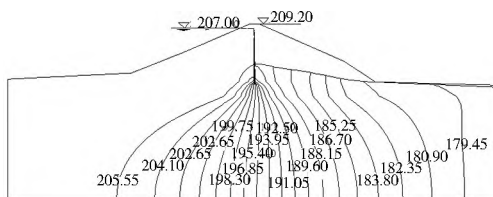


图5 正常蓄水位工况下典型断面加固后渗流等势线分布

Fig. 5 Seepage equipotential line distribution of the typical cross section after reinforcement under the normal water level

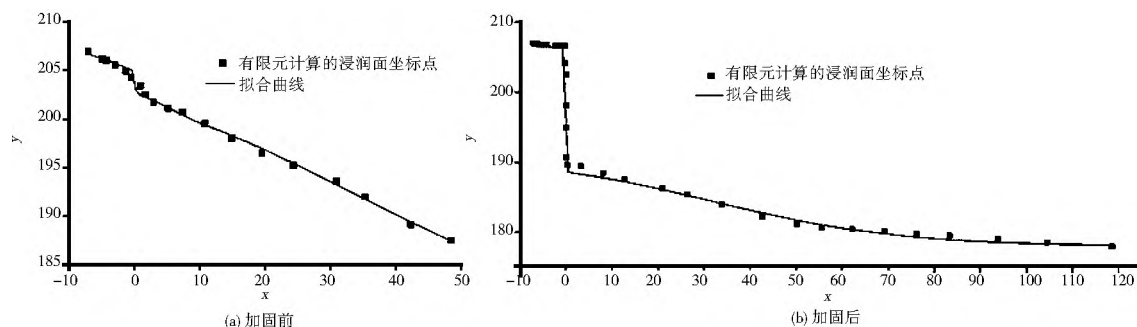


图6 加固前后典型断面浸润线拟合曲线

Fig. 6 Saturation line fitting curve of the typical cross section before and after reinforcement

3 结语

本文利用 Grouth/ Sigmoidal 公式的修改公式, 对白鸭山水库在除险加固前后的浸润线方程进行了计算分析, 在确定上游水位高程以及坝体填筑料与劈裂灌浆或防渗墙的渗透系数比值后可根据提出的拟合公式计算出浸润线的方程。通过与采用有限元分析计算所得到的成果进行对比分析, 结果表明本文提出的估算心墙坝坝体浸润线的简化计算方法能够较好地模拟心墙坝在除险加固前后浸润线位置的变化, 精度满足要求, 具有较好的普遍适用性。且该简化计算方法能够大大减少中小型水库大坝在进行除险加固方案比选时的计算工作量。

需要说明的是, 本文提出的浸润线计算公式, 只是适用于采用劈裂灌浆技术或者采用防渗墙进行除险加固的心墙坝, 且加固前原黏土心墙已基本失效。对于斜墙坝以及面板坝浸润线方程的研究有待进一步讨论。

参考文献(References):

[1] 陈玉茹. 基于土石坝渗流和坝坡稳定的二维有限元分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(4): 13-15. (CHEN Yir ru. Two dimensional finite element analysis of earth dam seepage and slope stability[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2014, 26(4): 13-15. (in Chinese))

[2] 盛金宝, 沈登乐, 傅忠友. 我国病险水库分类和除险技术[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 116-121. (SHENG Jir bao, SHEN Deng le, FU Zhong you. Classification and rehabilitation of de-

fective dams in China[J]. Hydro Science and Engineering, 2009 (4): 116-121. (in Chinese))

[3] 齐建伟, 任泽民, 王铁成. 土石坝除险加固的渗流分析[J]. 河北工业大学学报, 2007, 36(2): 84-88. (QI Jian wei, REN Ze min, WANG Tie cheng. Analysis on seepage flow of reinforced earth dam for except Danger[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2007, 36(2): 84-88. (in Chinese))

[4] 王海波, 陈吉森. 土石坝除险加固工程渗流分析[J]. 水利信息化, 2011(1): 48-51. (WANG Hai bo, CHEN Ji sen. Seepage analysis of reinforcement project for dander control of earth and rock fill dam[J]. Water Resources Informatization, 2011 (1): 48-51. (in Chinese))

[5] 庞琼, 王士军, 谷艳昌, 等. 土石坝垂直防渗加固措施综述[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 28-37. (PANG Qiong, WANG Shi jun, GU Yarr chang, et al. A review of vertical anti seepage reinforcement measures for earth and rockfilled dam[J]. Hydro Science and Engineering, 2014(4): 28-37. (in Chinese))

[6] 罗居剑. 垂直防渗技术在土石坝除险加固工程中的应用和设计优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 111-116. (LU O Ju jian. Application and optimal design of vertical anti seepage technology in rehabilitation engineering for earth rock dams [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(2): 111-116. (in Chinese))

[7] 庄德利, 王宁, 沈振中. 房山水库土坝多头小直径水泥土防渗墙加固效果评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 125-128. (ZHU ANG De li, WANG Ning, SHEN Zhen zhong. Reinforce cement effect evaluation for porous small diameter soil-cement anti seepage wall of fangshan reservoir earth rockfill dam[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(4): 125-128. (in Chinese))

[8] 黄荣卫. 低弹模混凝土防渗墙在土石坝工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2006(3): 50-52. (HU ANG Rong wei. Application of low elastic modulus concrete anti seepage wall in embankment

- 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))