

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.009

淹没条件下自激振荡脉冲水射流冲蚀试验研究

申 硕, 胡 东, 刘 曼, 何小婷

(湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了提高射流的冲蚀能力, 利用自制的自激振荡喷嘴, 在淹没条件下进行水射流冲蚀自制砂浆试块的试验研究, 得到不同工况下的水射流冲蚀效果。结果表明, 靶距对冲蚀效果有明显的影响; 脉冲射流的冲蚀体积与冲蚀深度随着腔长的增加, 先降低再增加, 到达峰值后逐渐递减, 在腔长 $L_c=4.5$ mm 时, 冲蚀体积达到最大; 在相同工况下, 脉冲射流的冲蚀体积比连续射流提高约 37.1%~52.3%。

关键词: 淹没条件; 自激脉冲射流; 腔长; 冲蚀

中图分类号: TD263.214

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)03-0041-05

Experimental Study on Self-Excited Oscillation Pulsed Water Jet Erosion under Submerged Conditions

Shen Shuo, Hu Dong, Liu Man, He Xiaoting

(Institute of Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to improve the jet erosion ability, the mortar block water jet eroding experiments were carried out by using own developed self-excited oscillation nozzle under submergence conditions, and the jet erosion effects were obtained under different operating conditions. The experimental results showed that target distance had obvious effects on the erosion effect; the jet erosion volume and erosion depth firstly decreased with the chamber length increasing, then increased, and gradually decreased after reaching the peak value; the erosion volume reaches the maximum at $L_c=4.5$ mm; and pulse jet erosion volume increases by about 37.1%~52.3% than the continuous jet.

Keywords: submergence conditions; self-excited pulsed jet; cavity length; erosion

0 引言

随着经济社会的发展, 在陆地上的资源逐渐枯竭, 而海洋占据地球表面积的 70%, 蕴藏大量自然资源, 并且大部分地区尚未开发, 具有巨大的开发潜力。开采海底矿物的海洋工程将为未来国民经济的持续发展提供强大的动力。利用高效水射流技术进行深海矿产开采具有广阔的开发前景^[1-2]。

关于高效水射流, 李根生^[3]等人提出一种双射流, 并设计了一款新型的射流喷嘴, 它是由中心直射流和同轴的环形旋转喷嘴形成的一种新型高效射流。在此基础上设计出双射流喷嘴, 并以混凝土(单轴抗压强度为 34 MPa)为人造试验岩样进行试验, 该试验通过研究喷嘴的各个结构参数对破岩效果的影响, 确定了双射流喷嘴的最佳结构参数。关于高分

收稿日期: 2013-04-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ9013), 湖南省教育厅科研基金资助项目(12C0066), 湖南工业大学大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湖工大教字[2012]19-31)

作者简介: 申 硕(1987-), 男, 河北邢台人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高效射流理论及应用,

E-mail: 454082929@qq.com

子添加剂射流, 杨永印^[4]和李兆敏等人^[5]对此的研究结果表明: 适量浓度的高分子添加剂射流降低了射流轴线的方向关联系数, 增加了射流等速核长度, 使其有效射程得到了极大提高。俄罗斯斯科钦斯基矿业研究所开发出来的此类产品使得破岩效率增加了约20%~25%。

作为高效水射流之一的自激振荡脉冲射流, 近几十年得到快速的发展。该装置体积小、结构简单、密封性好、可靠性高以及成本低廉, 无需附加外驱动机构。在切割、破碎和清洗矿物方面优势明显, 特别在深海采矿上潜力巨大。

关于自激振荡脉冲射流冲蚀破碎, 唐川林^[6]等人提出一种应用于滨海砂矿的新型开采技术, 同时进行了理论分析和实验验证。其工作原理是利用振荡脉冲射流作为气举破碎器, 预先将较为坚硬的土岩层进行破碎, 然后通过气举机构使砂矿颗粒进入气举吸头; 同时, 通过在某滨海砂矿的实验研究表明采用自激振荡脉冲射流能够较快的破碎土岩, 提高了采矿的工作效率。裴江红^[7]等人在非淹没条件下对自激振荡喷嘴的性能进行了实验研究。研究表明: 振荡腔内的不稳定剪切层对扰动波具有选择性的放大作用, 存在合适的结构参数使得扰动频率与喷嘴固有频率相匹配, 进而产生强烈的自振脉冲射流。经过对白砂砖(抗压强度为30 MPa)的冲蚀试验表明, 脉冲射流存在一个最佳靶距。高传昌^[8]等人进行了自激吸气式脉冲水射流在不同围压淹没条件下对石蜡(软质固体)的冲蚀实验研究。试验结果表明: 淹没条件下自激吸气式脉冲水射流的冲蚀效果要好于连续射流, 吸气量对冲蚀效果和打击力有明显影响。

本文利用现有理论参数所确定的自激振荡脉冲喷嘴^[9], 对自振脉冲射流在淹没条件下的冲蚀能力进行进一步研究。本文试验是在常压淹没条件下, 进行砂浆试块(抗压强度7.0 MPa)的冲蚀试验研究, 主要通过改变喷嘴腔长和射靶靶距, 得到相应条件下的砂浆试块的冲蚀体积以及冲蚀深度, 从而分析喷嘴腔长和靶距对冲蚀效果的影响。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示, 本次试验装置包括水泵、水箱、柱塞泵、蓄能器、抗震压力表、脉冲水射流喷嘴和安装固定砂浆试块的工作台等。砂浆试块和喷嘴分别通过夹具固定在试验台上。本次实验是通过安装在三柱塞泵上的卸荷阀来调节工作压力。为

了确保喷嘴入口工作压力的准确性, 在喷嘴入口前安装抗震压力表二, 用来读取喷嘴入口工作压力。

三柱塞机动往复高压泵, 型号为GA-3.6/50YA(宝鸡水泵厂); 试验台由高压水刀工作台改造而成; 自激振荡喷嘴为自制, 如图2所示。

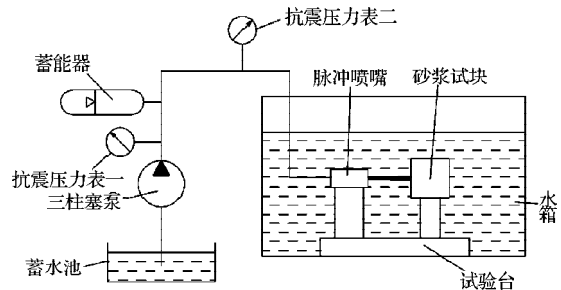


图1 冲蚀试验系统示意图

Fig. 1 Sketch of erosion experiment system

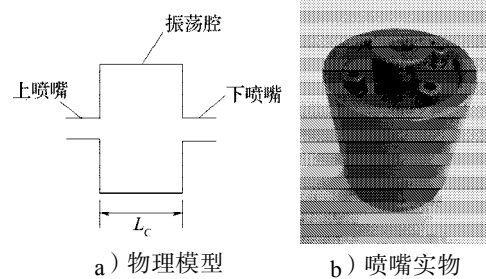


图2 自激振荡喷嘴结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of self-excited oscillation nozzle structure

试验系统的工作原理: 首先启动水泵向三柱塞泵供水, 等待水泵工作稳定后启动主电机, 通过圆柱齿轮减速器带动三柱塞泵, 然后由三柱塞泵产生高压水(通过卸荷阀水压至工作压力), 高压水经过蓄能器稳压后, 从脉冲射流喷嘴喷出, 在水箱中冲蚀试验台上的砂浆试块。

砂浆试块的制作, 按照行业标准JGJ/T 98—2010《砌筑砂浆配合比设计规程》进行设计, 初步设计其抗压强度为7.5 MPa。并依据行业标准JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行抗压强度检验。经测试, 砂浆试块的抗压强度为7.0 MPa。

1.2 试验方法

试验时, 先选定某一个需要研究的靶距或喷嘴腔长等试验参数, 在固定其它试验参数不变的条件下, 调节该选定参数, 测试该试验参数的改变对射流的冲蚀效果的影响, 从而确定试验参数与冲蚀效果之间的关系。本试验靶物为砂浆试块, 其抗压强度为7.0 MPa, 水射流冲蚀效果采用冲蚀孔的体积和冲蚀孔的深度来进行评价。

冲蚀效果的评价参数主要包括, 冲蚀孔的体积和冲蚀孔的深度, 冲蚀孔的孔径, 切割宽度。对于

本次试验,由于喷嘴直径很小(3 mm),冲蚀孔孔径和切割宽度均没有明显变化,所以选择冲蚀孔的体积和冲蚀孔的深度作为本次实验的评价标准。

冲蚀孔的体积(V/cm^3)。采用填盐法测量,先选定普通食盐,并在冲蚀孔中填满食盐,将食盐取出放在天平上测量其质量,天平的精度为3%,然后将其质量除以食盐的密度,得到冲蚀孔的体积。

冲蚀孔的深度(h/mm)。采用游标卡尺测量,在砂砖试件冲蚀孔的最低处,在此处选不同的3个点进行测量,然后取这3次的测量结果的平均值,并把平均值记为冲蚀深度。

2 试验结果及分析

2.1 已有的自激振荡喷嘴的频率冲蚀能力理论分析

1) 杨林等人利用流体网络理论得出的自激振荡脉冲射流喷嘴的固有频率^[10]。在不同腔长值的情况下其自激振荡射流频率是非线性的,如果射流频率与自激振荡喷嘴的固有频率匹配时,自激振荡效果会达到最佳,并且存在一个最佳腔长与射流压力峰值匹配,从而得到理想的冲蚀效果。

2) 在石油钻井工程的实践中,井底的岩石主要受泥浆液柱压力(p_m)和地层孔隙液体压力(p_t)的双重作用。当压差($\Delta p=p_m-p_t$)增大时,钻速下降;反之钻速上升。

熊继有建立的井底岩屑压持效应模型^[11],将作用在井底岩屑表面的的力分为两大类:一类是岩屑压持力(包括压差、射流冲击压力及岩屑重量);一类是岩屑排除有效力(脉冲射流的动压力或有效脉动)及剪切应力,即

井底岩屑压持力(p_p)为 $p_p=p_m-p_t+p_j+W$;

井底岩屑排除有效力(p_e)为 $p_e=p_o+\tau$,

式中: p_m 为井底液柱压力; p_j 为射流冲击压力; p_o 为射流动压力; τ 为剪切应力; p_t 为地层孔隙液体压力; W 为岩屑重量;

脉冲射流的动压力能够在岩石内部产生拉应力,当这种拉应力超过岩石的抗拉强度时就会引起岩石的拉伸破坏,而岩石的抗拉强度一般为其抗压强度的2%~10%,因此射流的动压力大时,给岩石造成了拉应力,易引起砂浆试块的拉伸破碎,实际上是增大了岩屑排除有效力。

2.2 脉冲射流冲蚀试验

试验条件:工作压力为5.0 MPa,冲蚀时间为30 s,靶距分别为5, 10, 15 mm。脉冲射流的冲蚀体积与喷嘴腔长的关系如图3所示,冲蚀深度与喷嘴腔长的关系如图4所示。

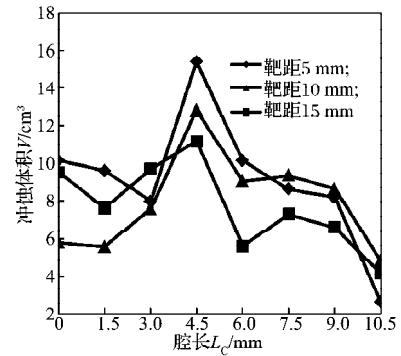


图3 脉冲射流冲蚀体积与腔长的关系图
Fig. 3 The relationship between pulsed jet erosion volume and cavity length

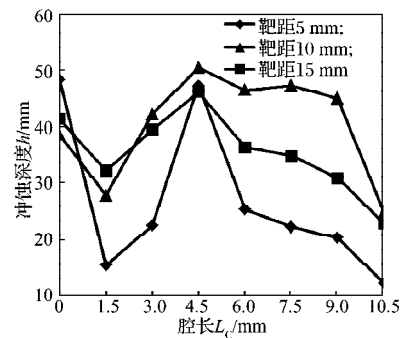


图4 脉冲射流冲蚀深度与腔长关系图
Fig. 4 The relationship between pulsed jet erosion depth and different cavity length

从图3和图4可以看出,当靶距一定时,随着腔长的增加,冲蚀体积先减小,后逐渐增加到峰值,最后再逐渐减小,在腔长为4.5 mm的位置处冲蚀体积达到峰值;当靶距一定时,随着腔长的不断增加,冲蚀深度先减小,后逐渐增大到峰值,到达峰值后冲蚀深度又逐渐减小。

在喷嘴腔长 $L_c=4.5$ mm时,冲蚀体积和冲蚀深度均达到最大值,冲蚀效果达到最佳。这是由于腔长是自激振荡喷嘴的重要的结构参数之一,如果流体的激励频率与喷嘴结构的固有频率特性相匹配,射流的压力振荡会更加剧烈,冲蚀效果更佳。一般认为存在一个最佳腔长范围使得射流压力峰值达到最大,这说明设计选择合理的振荡腔可以实现最佳冲蚀效果。本次试验采用的喷嘴只研究腔长的变化对冲蚀效果的影响,由前人研究^[12]可知本次试验所用的喷嘴的最佳腔长范围为4.4~5.0 mm,在这个腔长范围内自激振荡喷嘴的脉冲效果最佳,与砂砖试件冲蚀试验结果相符。

2.3 脉冲射流与连续射流的冲蚀效果对比

由前人研究^[13]可知,岩体在水射流作用下的破坏机理主要是在拉应力作用下的脆性破坏,岩体在射流的冲击下产生的拉应力和剪应力分别超过了岩

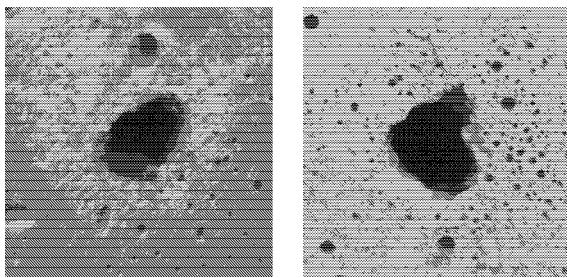
体低强度单元的抗拉和抗剪的极限强度,使得岩体中强度低的单元首先破坏,在岩体中形成裂隙.裂隙形成和汇交后,水射流将进入裂隙空间,在水楔作用下,裂隙尖端产生拉应力集中,使裂隙迅速发展和扩大,致使岩体破碎。

当试验条件为工作压力5.0 MPa,冲蚀时间为30 s的条件下,2种射流的靶距、冲蚀体积和冲蚀深度关系如表1所示。

表1 两种射流最大冲蚀效果与靶距关系
Table 1 The relationship between maximum erosion effects of and target distances for two jets

靶距/mm	冲蚀体积 V/cm^3		冲蚀深度 h/mm	
	连续射流	脉冲射流	连续射流	脉冲射流
5	10.742	15.386	45.573	48.280
10	9.366	12.842	51.090	50.397
15	7.334	11.169	35.493	46.140

对比连续射流与脉冲射流可以看出,脉冲射流的冲蚀体积显著大于连续射流,冲蚀体积提高37.1%~52.3%。这是由于在工作压力一定,靶距一定,淹没条件下,脉冲射流对物体冲击时产生的水锤压力远远超过连续射流的滞止压力。在相同的工作压力条件下,较大的冲击压力能够在更大程度的对砂浆试块造成破坏,已知脉冲射流的打击力在增大减小的过程中不断循环,脉冲射流的反复冲击能更有效的使材料本身存在的缺陷(如裂隙等)发生相互作用,从而大大增强了对被砂浆试块的破坏能力,即提高了射流的冲蚀性能,进而得出脉冲射流的冲蚀效果要强于连续射流。图5为靶距为10 mm时的砂浆试块冲蚀效果直观图。



a) 连续射流 b) 脉冲射流(腔长4.5 mm)

图5 砂浆试块冲蚀效果(靶距10 mm, 泵压5 MPa)

Fig. 5 Erosion effect of mortar block (target distance of 10 mm, the pump pressure 5 MPa)

从图中可以看出脉冲射流的冲蚀面积大于连续射流,这是由于脉冲射流在冲蚀过程中产生空化现象^[14],流体产生的空泡在砂浆试块表面发生空泡的溃破,所产生冲击破坏作用使得固体表面的冲蚀面积增大。

3 结论

1) 对于脉冲射流冲蚀砂浆试块,在靶距 $L=5$ mm的条件下,冲蚀体积大于另外两种靶距条件下(10, 15 mm)的冲蚀体积,说明随着靶距的增加射流的冲蚀能力逐渐减弱。

2) 对于脉冲射流,在靶距确定的条件下,随着腔长的递增,冲蚀体积有一个先递减,再减小的趋势,并在喷嘴腔长 $L_c=4.5$ mm时,冲蚀体积达到最大。说明存在最佳腔长使得脉冲射流的自激振荡效果达到最佳,从而提高水射流的冲蚀效果。

3) 脉冲射流的冲蚀体积明显大于连续射流的冲蚀体积,两种射流的冲蚀深度较为一致。脉冲射流的冲蚀体积比连续射流提高约37.1%~52.3%;两种射流的冲蚀深度没有显著区别。

参考文献:

- [1] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 390-414.
Sheng Zhonghou. Water Jet Theory and Technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998: 390-414.
- [2] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006: 198-237.
Xue Shengxiong. High Pressure Water Jet Technology & Engineering[M]. Hefei: HeFei University of Technology Press, 2006: 198-237.
- [3] 李根生, 宋 剑, 胡永堂, 等. 双射流破岩钻孔参数实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 68-71.
Li Gensheng, Song Jian, Hu Yongtang, et al. Experiment Study on Rock Breaking Parameters of Dual-Jet[J]. Journal of China University of Petroleum: Nature Science Edition, 2006, 30(1): 68-71.
- [4] 杨永印, 王瑞和, 沈忠厚, 等. 聚丙烯酰胺浆体旋转射流速度分布的实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(6): 38-41.
Yang Yongyin, Wang Ruihe, Shen Zhonghou, et al. Experimental Study on Velocity Distribution of Swirling Jet with Polyacrylamide Fluid[J]. Journal of the University of Petroleum: Nature Science, 2001, 25(6): 38-41.
- [5] 李兆敏, 刘成文. 高分子添加剂射流结构特性的试验研究[J]. 钻井液与完井液, 1999, 16(6): 1-3, 23.
Li Zhaomin, Liu Chengwen. An Experimental Investigation of the Structure Characteristics of Additive Jets[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1999, 16(6): 1-3, 23.
- [6] 唐川林, 廖振方, 张风华. 滨海砂矿开采用气举和振荡脉冲射流的研究[J]. 江苏煤炭, 2000(1): 41-44.

- Tang Chuanlin, Liao Zhenfang, Zhang Fenghua. Study on Airlift and Oscillation Pulsed Jet in Exploiting Deep Beach Placer[J]. Jiangsu Coal, 2000(1): 41-44.
- [7] 裴江红,唐川林,张风华,等.非淹没射流条件下自激振荡脉冲射流喷嘴试验研究[J].矿山机械,2006,34(10): 96-98.
- Pei Jianghong, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua, et al. Experimental Study on the Self-Excited Oscillation Pulsed Nozzle Under Non-Submerged Condition[J]. Mining & Processing Equipment, 2006, 34(10): 96-98.
- [8] 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(1): 53-56, 63.
- 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(1): 53-56, 63.
- [9] 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 Zhenfang, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua. Experiment of the Self-Excited Oscillation Pulsed Jet Nozzle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2): 28-32.
- [10] 杨林,唐川林,李晓红,等.自激振荡脉冲射流装置的频率特性[J].西南石油学院学报,2001,23(1): 43-45.
- Yang Lin, Tang Chanlin, Li Xiaohong, et al. Frequency Characteristics of Pulsation-Jet Device of Self-Excited Oscillation[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(1): 43-45.
- [11] 熊继有.脉冲射流喷嘴的清岩与破岩机理[J].天然气工业,1995,15(2): 38-40.
- Xiong Jiyou. Clear Rock and Rock Breaking Mechanism of Pulse Jet Nozzle[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 38-40.
- [12] 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.
- [13] 常宗旭,郜保平,赵阳升,等.煤岩体水射流破碎机理[J].煤炭学报,2008,33(9): 983-987.
- Chang Zongxu, Xi Baoping, Zhao Yangsheng, et al. Mechanical of Breaking Coal by Water Jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 983-987.
- [14] 卢义玉,李晓红,向文英.空化水射流破碎岩石的机理研究[J].岩土力学,2005,26(8): 1233-1237.
- Lu Yiyu, Li Xiaohong, Xiang Wenying. Rock Erosion Mechanism of Cavitating Water Jets[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1233-1237.

(责任编辑:申 剑)