

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1043-06

脉冲磨料射流破碎岩石的实验研究

李晓红, 向文英, 卢义玉

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 在淹没和非淹没状态下研究了脉冲射流的动态特性、振荡腔腔长、靶距、磨料浓度等参数与脉冲磨料射流的切割和冲蚀性能的关系, 对比分析了脉冲磨料射流与前混合磨料射流在相同实验条件下对花岗岩及石灰岩等的冲蚀性能。实验结果表明, 自激振荡射流频率随腔长增大而减小, 随压力及流量的增大而增大; 脉冲磨料射流的体积冲蚀速度在淹没状态下是前混合磨料射流的 1.7 倍, 而在非淹没状态下为前混合磨料射流的 1.4 倍。

关 键 词: 脉冲磨料射流; 淹没和非淹没状态; 岩石破碎

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on rock-cutting experiments of pulsed abrasive water jet

LI Xiao-hong, XIANG Wen-ying, LU Yi-yu

(Key Lab. for the Exploitation of Southwest Resources & Environmental Disaster Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The dynamic characteristics of pulsed water jets and the relationship between length of oscillating chamber, standoff distance, abrasive concentration and erosion rate as well as cutting specific energy for the pulsed abrasive water jet were investigated by experiments under submerged and in the air. The cutting and erosion capabilities of the pre-mixed abrasive water jet and the pulsed abrasive water jet on granite and limestone were analyzed comparatively. It is shown that the self-oscillating frequencies decrease with the length of chamber and increase with the pressure and runoff, the erosion rate of the pulsed abrasive water jet are 70 percent larger than those of the pre-mixed abrasive water jet in the submerged conditions, as well as 40 percent in the air.

Key words: pulsed abrasive; water jet; in the submerged and in the air; rock-cutting

1 引 言

李晓红、卢义玉和杨林等人已分别从振荡腔中混合流体的波速、喷嘴装置的流体网络模型和磨料与空化等方面对脉冲磨料射流的频率特性及冲蚀效果进行了理论研究和数值计算分析^[1-6], 为进一步研究和验证脉冲磨料射流的特性, 本文将从实验角度对脉冲磨料射流进行研究。由于振荡腔内混合流体运动十分复杂, 要直接验证某些理论结果比较困难, 限于实验设备和测试手段, 只能通过一些间接的对比性实验进行定性研究。实验的主要内容有:

- (1) 非淹没条件下脉冲射流的动态特性;
- (2) 非淹没条件下脉冲磨料射流的冲蚀性能;
- (3) 淹没条件下脉冲射流的动态特性;
- (4) 淹没条件下脉冲磨料射流的冲蚀性能。

2 实验设备与测试系统

淹没和非淹没的实验设备和测试系统如图 1 所示。其中实验的主要设备有:

- (1) 三柱塞往复泵: 流量为 100 L/min, 压力为 0~31.5 MPa;
- (2) 磨料罐 I, 交替供砂或作蓄能稳压用;
- (3) 磨料罐 II, 供砂用;
- (4) 溢流阀及高压软管;
- (5) 射流实验台: 本实验台是自行研制开发的具有全自动功能的数控射流切割装置, 主要由磨料射流发生系统、切割工作台和控制系统组成。实验台由普通车床改装而成, 喷嘴装置安装在刀架上, 可实现 x , y , z 三个方向的位置调节, 使测试靶盘和喷嘴易于对中。控制系统具有一定的图形编辑功

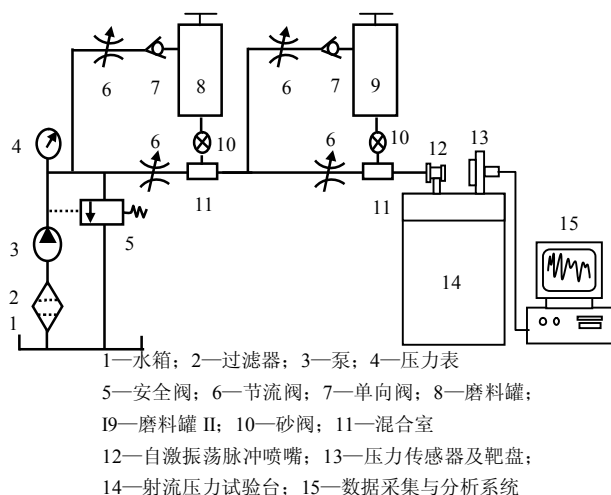


图1 射流动态压力实验及测试系统

Fig.1 System of the experimental and measuring dynamic pressure of jet

能，并可实现对任意格式的图形文件的消色、矢量化处理和自动或人工编程控制切割过程，靠计算机控制步进电机驱动、喷嘴运动和各阀门动作，可实现多种材料任意二维图形的切割加工。实验台可用于射流非淹没下动态压力信号的测试、射流淹没和非淹没下冲蚀和切割性能的测试，辅助测试仪器和数据处理软件可实现射流的多种测试功能。

振荡脉冲磨料喷嘴主要参数选用： $\frac{d_2}{d_1}=0.8\sim 1.8$,

$\frac{D}{d_1}=8\sim 20$, $\frac{L}{d_1}=0\sim 7$ ；其中， d_1 为下游喷嘴直径； d_2 为上游喷嘴直径； L 为振荡腔长， D 为振荡腔直径。主要测试仪器有：

- ① 压力传感器和自制电压信号放大器；
- ② ZLS 数据采集卡及计算机处理系统；
- ③ 271-11 型压力表校验器；
- ④ A/D 信号转换卡，动态数字信号处理软件

Labstar 3.0。

为了找出计算机记录曲线的数字量与射流动态滞止压力信号在数值上的对应关系，在测量前对测试系统进行了标定。由于测试系统的频率响应范围较大（3 000 Hz 以上），且测试系统响应频率远远大于自激振荡射流的脉冲频率，故系统采用压力表校验器进行静态标定。

3 冲击特性分析

按照多相流连续介质假设，在磨料射流中，可认为各相介质象单相流体一样在其占据的空间内满足场方程，对于岩石受到的冲击力 F_m 可按下式计算。

$$F_m = \rho_p Q_p v_p + \rho_f Q_f v_f \quad (1)$$

在前混合磨料射流中，冲击压强 p_m 为

$$p_m = \rho_p v_p^2 + \rho_f v_f^2 \quad (2)$$

式中 ρ_p , ρ_f 分别表示磨料颗粒、水体的密度 (kg/m^3)； Q_p , Q_f 分别为磨料与水体的流量 (m^3/s)； v_p , v_f 分别为磨料与水体的流速 (m/s)。

脉冲磨料射流中产生的冲击压强为

$$p_m = \rho_p a v_p + \rho_f a v_f \quad (3)$$

式中 a 为波速，由于射流速度 v_f , $v_p \ll a$ 波速，脉冲磨料射流的冲击压力远远大于前混合磨料射流的冲击压力。

4 切割破碎岩石的实验研究

实验所用的各种测量仪表具有足够的精度，并经常进行校准，每个环节的实验和测量条件保持一致。每个喷嘴的冲蚀实验进行 3 次，对于多次重复的实验结果，按狄克逊准则进行分析处理。由于脉冲射流压力波形是由多重频率分量组成的应变波形，必须进行频谱分析。根据 Fourier 级数理论，任一周期压力函数 $p(t)$ 都可用一个无限项的三角级数 $f(t)$ 来代表，则有

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n (a_i \cos \frac{2\pi}{T} it + b_i \sin \frac{2\pi}{T} it) \quad (4)$$

式中 T 为波形函数的周期。

若用 $f(t)$ 来近似代表波形函数 $p(t)$ ，则存在偏差 $\Delta f(t)$ 为

$$\Delta f(t) = p(t) - f(t) \quad (5)$$

如果将 t 轴在 $[0, T]$ 区间分成 M 等分，在各 t_j ($j=1, 2, \dots, M$) 处都有相应的 $\Delta f(t_j)$ 。由最小二乘法原理，当他们的偏差均方值最小时，三角多项式最逼近于波形函数 $p(t)$ 。由此可定出系数 a_0 , a_i , b_i 为

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M p(t_j) \quad (6)$$

$$a_i = \begin{cases} \frac{2}{M} \sum_{j=1}^M p(t_j) \cos i(j \frac{2\pi}{M}) & \left(i \neq \frac{M}{2} \right) \\ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M p(t_j) \cos j\pi & \left(i = \frac{M}{2} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$b_i = \begin{cases} \frac{2}{M} \sum_{j=1}^M p(t_j) \sin i(j \frac{2\pi}{M}) & \left(i \neq \frac{M}{2} \right) \\ 0 & \left(i = \frac{M}{2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

如果令： $a_i = A_i \sin \alpha_i$, $b_i = A_i \cos \alpha_i$ ，则 $f(t)$ 可以写为

$$f(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\frac{2\pi}{T} it + \alpha_i) \quad (9)$$

式中 $A_0 = \frac{a_0}{2}$, $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$, $\alpha_i = \tan^{-1} \frac{a_i}{b_i}$, $n \leq \frac{M-1}{2}$ 。

振荡压力信号的强弱用峰值(最大值与最小值)均方根值 P_{rms} 、脉动率 δ_p 和均值 P_μ 来表征:

$$P_{\max} = p(t)_{\max} \quad (10)$$

$$P_{\min} = p(t)_{\min} \quad (11)$$

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \left[\frac{p^2(0) + p^2(t_M)}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} p^2(t_i) \right]} \quad (12)$$

$$\delta_p = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_0} \quad (13)$$

$$P_\mu = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p(t) dt \quad (14)$$

式中 $P_{\max}$, $P_{\min}$, P_0 分别为最大、最小与系统压力。

评价冲蚀性能的体积冲蚀速度 V_v 、比能耗 E 计算公式如下:

$$\begin{aligned} V_v &= V/t \\ E &= P_{rms} Q / \dot{V} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 V 为冲蚀体积; t 为冲蚀时间; Q 为喷嘴出流流量。

4.1 非淹没与淹没条件下射流的动态特性

4.1.1 非淹没条件下射流的动态特性

在非淹没条件下, 测试了纯水脉冲射流的动态特性及脉冲磨料射流在石灰岩试件上的冲蚀特性。在不加磨料自由射流的条件下, 测试了各主要流体参数压力和喷嘴结构参数振荡腔长对自激振荡脉冲射流动态特性的影响。

实验及测试装置如图1所示, 压力传感器信号通过数据采集与分析系统 Labstar 3.0 进行压力信号的记录, 通过FFT频谱分析可得出压力振荡的主频, 实验结果如图2~6所示。

由图2典型的射流轴心压力动态波形可以看出射流压力的振荡。图3为射流轴心压力波形相应的频谱图, 图3表明, 射流压力振荡集中在低频段上,

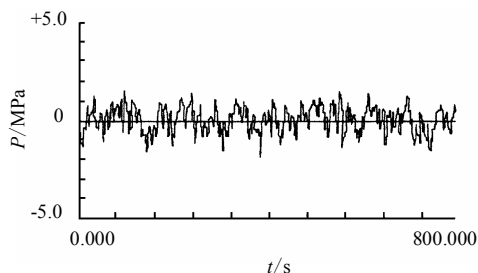


图2 实测自由射流轴心压力波形

Fig. 2 Typical measuring axle center pressure waveform of the oscillating jet in air

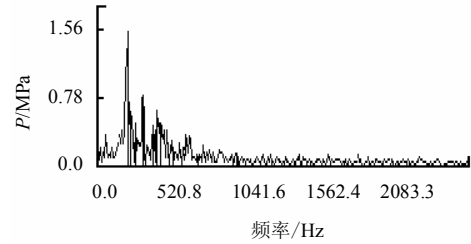


图3 自由射流轴心压力频谱图

Fig. 3 Typical axle center pressure frequency spectrum of the oscillating jet in air

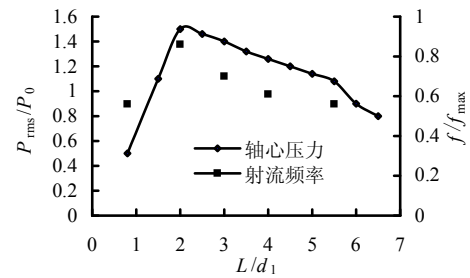


图4 自由射流轴心压力均方根值及频率随腔长的变化

Fig. 4 Variation of axle center pressure and frequency with the length of oscillation cavity

与其频率特性的理论分析一致。图4为射流轴心压力均方根值及振荡频率随振荡腔长的变化。

4.1.2 淹没条件下射流的动态特性

对自激振荡脉冲纯水射流在淹没条件下进行了动态压力的测试, 其典型的压力频谱如图5所示, 实验中发现随着靶距的增加, 压力频谱中各频率成份对应的幅值发生了变化, 特别是低频分量得到进一步的激励, 使得射流振荡更为有序, 这就有可能提高射流的有效靶距。

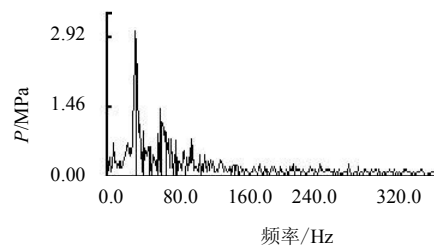


图5 淹没射流轴心压力频谱图

Fig. 5 Typical axle center pressure frequency spectrum of the oscillating jet in water

由淹没条件下, 纯水自激振荡射流动态压力随振荡腔长的变化关系(图6)可见, 产生强烈自激振荡的腔长要大一些。这是由于在淹没条件下从喷嘴喷出的自激振荡射流又与周围环境水流发生动量交换的结果。同样射流频率随振荡腔长增加而减小。

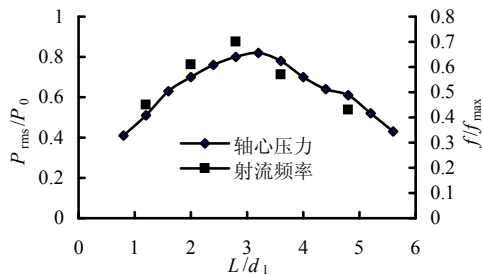


图6 淹没射流轴心压力均方根值及频率随腔长的变化
Fig.6 Variation of axle center pressure and frequency with the length of oscillation cavity in water

实验中还发现，在没有图1系统中磨料罐I的参与下，射流的最佳振荡幅值比有罐I时大，而且振荡波形有序。说明如果匹配得恰当，低频的泵源脉动经由振荡喷嘴可以被放大，从而改善射流的振荡效果。

结合理论分析，通过对自激振荡纯水射流的动态特性实验研究，可以得出以下几点看法：

(1) 结构参数 (L/d_1 , d_2/d_1 , 腔室形状等) 和射流流体参数 (如压力、流量) 有以下特点：腔长过短不能形成剪切层或剪切层不稳定性对该范围的扰动不敏感；腔长过大，反馈的扰动不能有效激励分离区新涡量脉动的产生。射流的振荡特性与腔内流体中压力扰动波的传播速度直接相关，波速小，频率低，波速大，则频率高，流体参数影响着波速，从而影响射流最终的振荡特性。

(2) 从上喷嘴喷出的高速紊流流体包含的频率成份很多，各频率成份对应的脉动幅值不同，只有频率接近由结构参数和流体参数共同决定的喷嘴装置的固有频率的扰动被放大，其振荡幅值最大，能量集中。从流体动力学角度来看，这就反映了剪切层不稳定性对扰动的选择放大作用。所以设计喷嘴时应针对不同的高压，系统地考虑流体脉动主频。

(3) 在发生强烈的自激振荡时，射流轴心压力脉动强烈，有时压力为负值，这就为水中气泡的形成创造了良好的条件，故射流伴随有空化作用。

(4) 从图4与图6的对比中发现，两者对应的最佳腔长范围相差不大，说明在磨料粒度较小、浓度不高时，由于磨料的弹性模量较大，磨料的存在使得流体粘性增大，对波速影响较小，因而对射流振荡频率特性影响不大。

4.2 非淹没条件下射流的冲蚀性能

在自由射流的条件下，实验研究振荡腔腔长对脉冲磨料射流冲蚀性能的影响规律。实验条件为：系统压力 $P_0=10$ MPa，下游喷嘴直径 $d_1=1$ mm，

$d_2/d_1=1.4$ ，磨料为 80#石英砂，磨料浓度为 22.5 % (重量浓度)，靶距为 10 mm，冲蚀时间：90 s；试件为厚 50 mm 的石灰岩，抗压强度为 30 MPa。实验结果如图7和图8所示。

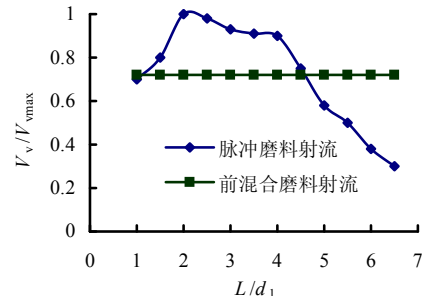


图7 振荡腔长与冲蚀体积率的关系
Fig.7 Variation of damaged volume rate with L/d_1

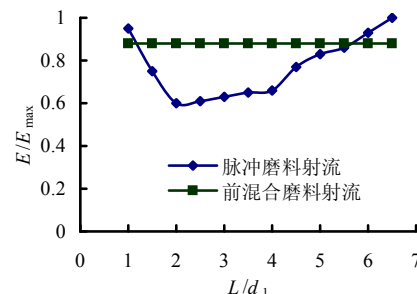


图8 振荡腔长与比能耗的关系
Fig.8 Variation of energy rate with L/d_1

由图7、图8可见，在相同条件下，脉冲磨料射流比普通的前混合磨料射流效率高，体积冲蚀率 V_v 最大提高约 38 %，随之射流的比能耗也得以降低；脉冲磨料射流的冲蚀性能随振荡腔腔长的变化规律与纯水振荡射流类似，也存在一最佳范围（本实验中约为 $L/d_1=2$ ）。这首先说明与普通前混合磨料射流相比，磨料粒子在振荡流中获得了更好的加速效果，或磨料发生分团使得局部浓度提高；同时也表明，只有在振幅高的频率流场中，磨料才能获得好的加速及分团效果。当腔长太小时，无法形成有效振荡；而当腔长太大时，系统没有处于谐振状态，却增加了能量损失，并增大了靶距，所以冲蚀效果都不好。

4.3 淹没条件下射流的冲蚀性能

4.3.1 振荡腔腔长对冲蚀性能的影响

实验条件如下：系统压力 $P_0=15$ MPa，下游喷嘴直径 $d_1=1$ mm， $d_2/d_1=1.4$ ，磨料为 80#石英砂，磨料浓度为 22.5 %，横移速度为：70 mm/min，靶距为 10 mm，喷嘴淹没深度为 500 mm；试件为厚 30 mm 的花岗岩板，抗压强度为 170 MPa。实验结果如图9~11所示，通过对比淹没下前混合磨料射

流与脉冲磨料射流在淹没和非淹没下对花岗岩试件的冲蚀实验结果有以下几点看法:



图9 花岗岩试件实物图
Fig.9 Photo of testing granite target

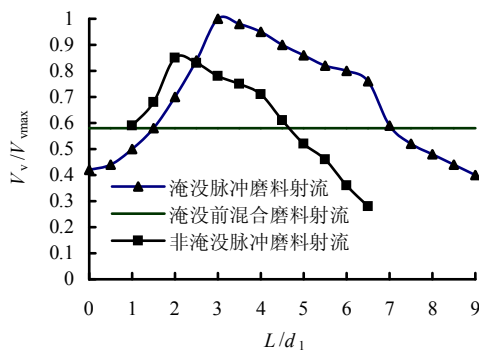


图10 振荡腔长与冲蚀体积率的关系
Fig. 10 Variation of damaged volume rate with L/d_1

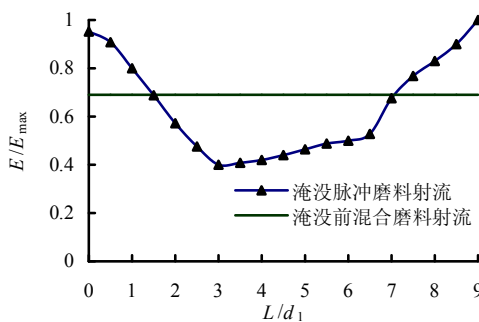


图11 振荡腔长与比能耗的关系
Fig.11 Variation of energy rate with L/d_1

(1) 在淹没和非淹没条件下, 脉冲磨料射流的冲蚀性能随振荡腔腔长的变化规律基本一致, 只是最佳腔长有所不同, 非淹没状态下 $L/d_1=2$ 左右, 而淹没状态下 $L/d_1=3$ 左右; 在有效腔长范围内 $1.5 < L/d_1 < 7$ 时, 形成强烈的自激振荡, 磨料获得良好的脉动加速和分团, 能量传输效率得到提高, 同时在脉动状态下, 增大了射流的有效工作靶距, 从而使得脉冲磨料射流的冲蚀体积速度提高, 比能耗降低。

(2) 在非淹没条件下, 射流对花岗岩的冲蚀痕迹较光滑, 而淹没条件下, 花岗岩的射流冲蚀处较为粗糙, 这说明射流有空化作用, 在脉冲磨料射流中, 除射流自身振荡空化效应外, 由于流体压力、流速的振荡, 加之射流的紊动特性, 使水中悬浮的

磨粒产生旋涡气泡, 并在靶体附近受射流冲击压力波的作用溃灭, 使材料遭受空蚀破坏。另一方面, 空泡溃灭时空泡附近部分小粒径的磨粒受到进一步的加速使其动能提高, 高速含砂的涡体对材料的反复作用, 加剧了靶材的破坏。同时, 由于磨料的加入, 水的粘滞性明显加大, 空泡溃灭过程中能耗增加, 溃灭速度降低, 从而对空蚀起一种阻滞作用。综上所述, 由于淹没下脉冲磨料射流空化作用使得其冲蚀能力提高, 又由于磨料对空化的阻滞作用, 相对纯水而言, 其空化作用又较弱。

4.3.2 靶距对冲蚀性能的影响

选用 $L/d_1=3$, 其他实验条件不变, 实验结果如图12和图13所示。

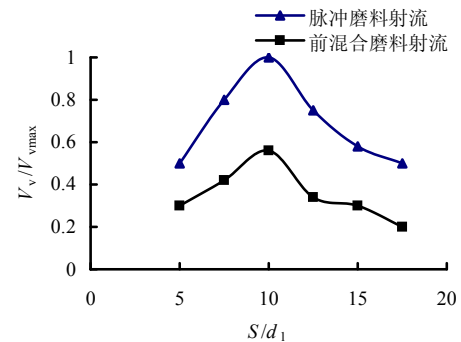


图12 靶距与冲蚀体积率的关系
Fig.12 Variation of damaged volume rate with S/d_1

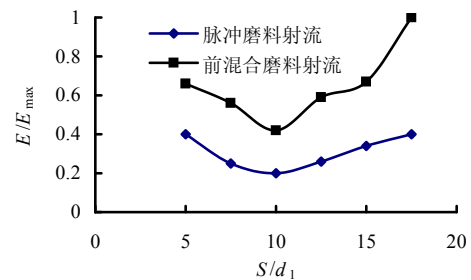


图13 靶距与比能耗的关系
Fig.13 Variation of energy rate with S/d_1

从图中可以看出, 存在一最优靶距使射流的切割效果最好。在该最优靶距时脉冲磨料射流的体积冲蚀速度分别是前混合磨料射流的1.72倍。脉冲磨料射流在自激振荡过程中负压导致水中气体逸出, 产生气泡。气泡的产生, 一方面在射流与淹没水介质边界层形成携带气泡的大结构涡环, 导致剪切层内的等粘性系数减小, 从而使剪切层随时间的增长率减小, 射流能量沿径向扩散的程度降低, 有效靶距增大; 另一方面, 由于一部分空化气泡在靶材附近受到射流压力冲击波作用才溃灭, 同时溃灭时气泡附近的小粒径磨粒得以进一步加速, 所以在宏观

上射流的空化效应提高了射流的有效靶距。

4.3.3 磨料浓度对切割性能的影响

在 $L/d_1=3$, 其他实验条件不变, 改变磨料浓度, 实验结果如图 14 所示。

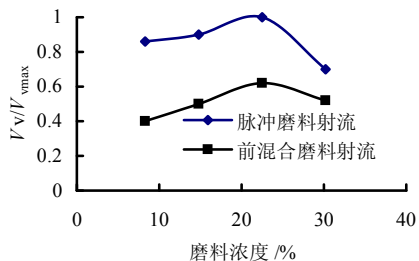


图 14 淹没下射流冲蚀体积率与磨料浓度的变化

Fig. 14 Variation of damaged volume rate with abrasive weight concentration

随着磨料浓度的增加, 一方面磨料颗粒的数目增加, 有利于切割; 另一方面, 脉冲磨料射流的振荡幅度的降低, 使得磨料总的动能降低, 同时磨料颗粒间的碰撞几率增大, 从而消耗其动能。在低磨料浓度的情况下, 增加磨料量, 对冲蚀起主要作用的是磨料数量, 而磨料速度的略微下降对冲蚀性能影响不大, 而当磨料浓度增大到一定值时, 磨料粒子的动能下降较大, 冲蚀性能反而下降。

5 结 论

在淹没及非淹没条件下, 自激振荡脉冲射流的压力动态特性实验表明:

(1) 自激振荡射流频率都集中在低频段, 且随腔长的增大而减小, 随压力、流量的增大而增大;

(2) 只有上游喷嘴来流频率接近由结构参数和流体参数共同决定的喷嘴装置的固有频率时扰动被放大, 其振荡幅值最大;

(3) 在淹没和非淹没条件下, 射流冲蚀石灰石和花岗石性能的实验表明: 脉冲磨料射流的冲蚀性能随振荡腔腔长的变化规律基本一致, 只是最佳冲蚀效果对应的腔长不同, 非淹没状态下 $L/d_1=2$ 左右, 而淹没状态下 $L/d_1=3$ 左右; 在有效腔长范围内增大了射流的有效工作靶距, 从而使得脉冲磨料射流的冲蚀体积速度提高, 比能耗降低;

(4) 脉冲磨料射流中存在一最优磨料浓度值。在此最优浓度下, 脉冲磨料射流的体积冲蚀率在淹没状态下分别是前混合磨料射流的 1.7 倍左右, 而在非淹没状态下为 1.4 左右。

参 考 文 献

- [1] LU Yi-yu, LI Xiao-hong, YANG Lin. Effects of gas content in fluid on oscillating frequencies of self excited oscillation water jets[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(11): 1 058—1 061
- [2] 李晓红, 王建生, 卢义玉, 等. 自激振荡磨料射流的基本理论与初步试验[J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(5): 12—16.
LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng, LU Yi-yu, et al. Primary theory and experiment of a self-oscillating abrasive waterJet[J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(5): 12—16.
- [3] 卢义玉, 李晓红, 廖勇, 等. 脉冲磨料射流主要参数对切割性能的影响[J]. *重庆大学学报*, 2002, 25(5): 116—123.
LU Yi-yu, LI Xiao-hong, LIAO Yong, et al. Effect of main parameters on cutting of the pulsed abrasive water jet[J]. *Journal of Chongqing University (Nature Science Edition)*, 2002, 25(5): 116—123.
- [4] 卢义玉, 李晓红, 王建生. 自激振荡磨料射流中的磨料加速机理[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(2): 205—208.
LU Yi-yu, LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng. Abrasive accelerated mechanisms in the self-oscillating abrasive water jet[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(2): 205—208.
- [5] 杨林, 李晓红, 王建生, 等. 碰撞剪切流动中波速对自激振荡射流频率的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2000, 10(6): 46—50.
YANG Lin, LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng, et al. Effects of wave speeds in impinging shear flow on frequencies of the self-excited oscillation pulsed water jets[J]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10(6): 46—50.
- [6] 杨林, 李晓红, 王建生, 等. 自激振荡脉冲磨料射流中波速对频率的影响[J]. *重庆大学学报*, 2000, 23(5): 5—20.
YANG Lin, LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng, et al. Effects of water speed on frequencies of the self-excited oscillation pulsed abrasive water jets[J]. *Journal of Chongqing University (Nature Science Edition)*, 2000, 23(5): 5—20.