

文章编号: 1000-582x(2000)05-0004-04

自激振荡脉冲磨料射流中波速对频率的影响

杨林, 李晓红, 王建生, 卢义玉

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

0358
TE2

摘要: 自激振荡脉冲磨料射流的振荡频率决定着磨料的加速效果和射流的空化效应, 分析了自激振荡脉冲磨料射流中压力扰动波的传播速度及其对射流振荡频率的影响规律, 数值计算表明: 磨料的浓度、密度及体积弹性模量对波速影响幅度很小, 而气体的存在对射流中波速影响很大, 很少量的气体就会使波速降低很大, 射流振荡的频率随波速的减小而明显增大。结果对设计自激振荡脉冲磨料射流喷嘴有指导意义。

关键词: 自激振荡; 磨料射流; 波速; 振荡频率

中图分类号: O 358

文献标识码: A

脉冲射流
石油钻井

为了提高射流的冲蚀能力, 即提高射流破碎、清洗和切割的工作效率, 目前国内外主要致力于研究新的射流装置与工艺。一些新型射流如空化射流、前混合磨料射流、后混合磨料射流、间断射流、脉冲射流及自激振荡脉冲射流等在切割、除锈、石油钻井等方面已发挥了很大的作用^[1]。其中自激振荡脉冲射流结构简单, 具有较大的变压特性和很强的空化作用, 工作效率是普通连续射流的数倍, 采用自激振荡脉冲射流喷嘴的牙轮钻头在相同条件下可提高钻井机械钻速 25%~50%, 提高钻头进尺 10%~15%^[2,3]; 前混合磨料射流的出现使射流的冲蚀和切割能力大幅度提高, 其系统压力比后混合磨料射流可降低两个数量级。为了进一步提高射流的切割和冲蚀效果, 笔者提出一种自激振荡脉冲射流和前混合磨料射流相结合的新型射流——自激振荡脉冲磨料射流。初步试验结果表明, 自激振荡脉冲磨料射流在岩样上钻孔深度优于前混合磨料射流, 最大钻孔速度提高约 41%^[4,5], 显示了自激振荡脉冲磨料射流优越性。

决定自激振荡脉冲磨料射流冲蚀效果的主要因素是射流中磨料动能的大小和空化效应的强弱。射流的振荡频率直接影响这两方面, 空泡形成、发展和磨料加速都需要一定的时间, 所以只有在一定的频率范围内, 射流产生空化的概率较大而且磨料颗粒也能获得较大

的加速, 从而降低射流的比能耗, 提高射流的冲蚀效果。射流振荡频率受压力波波速直接影响, 而波速与振荡腔室的结构和射流本身特性的有关。由于振荡腔内流场很复杂, 属气(汽)、液、固多相流动, 振荡腔内压力波传播速度有其不同的特性, 因此只有了解振荡腔内压力波速的变化规律及其对射流频率的影响, 才能获得自激振荡脉冲磨料射流最佳冲蚀效果。

1 自激振荡脉冲磨料射流的工作原理

图 1 为自激振荡脉冲磨料射流喷嘴结构示意图, 上游喷嘴中高速磨料射流束的不稳定扰动波如微量脉动在穿过腔内剪切层时, 剪切层对其具有放大作用, 形成大尺度的涡环结构, 剪切流动中涡环与下游碰撞壁撞击在碰撞区产生压力扰动波并向上游反射, 在上游剪切层分离处诱发新的扰动产生, 涡环频率与振荡腔固有频率接近时即新扰动与原扰动频率匹配且具有合适的相位关系时, 射流上游就被不断地周期性激励, 其固有波形受到调制, 腔内就产生流体自激振动并在下游喷嘴出口形成脉冲射流。由于射流的卷吸作用振荡腔内处于脉动负压状态, 靠射流边界的脉动贮存能量, 真空度变化规律与振荡腔结构尺寸、涡旋频率和幅值有直接关系。

收稿日期: 2000-03-06

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(59725410); 中国博士后科学基金项目

作者简介: 杨林(1970-), 男, 四川南部人, 重庆大学讲师, 在职博士生。主要从事水射流及空气净化领域的研究。

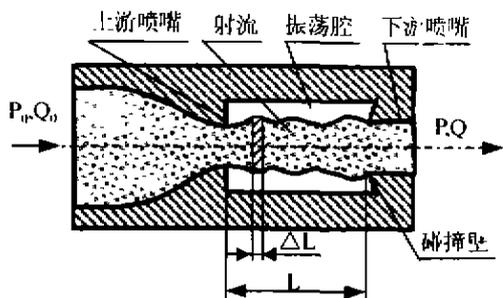


图 1 自激振荡脉冲磨料射流喷嘴示意图

磨料在脉动流状态下进行能量交换和加速,一定频率的压力振荡使得磨料获得高于从上游喷嘴出来的初始速度;另一方面,一定频率的压力振荡和大尺度涡环结构的存在有利于空泡初生,在水中形成的气核也易于获得动量而长大,进入腔内的空气也能很好地跟随液体运动,从而使射流具有较强的空化作用。由射流自激振荡的机理可知,如振荡腔内同时有 n 个涡环,射流的振荡频率为^[6]

$$f = \frac{n}{L / (1/a_+ + 1/a_-)} \quad (1)$$

式中 $n = 1, 2, 3, \dots$ 为模态数; L 为振荡腔长, m ; a_+, a_- 分别为振荡腔内扰动压力波向上游和向下游传播的速度, m/s 。Rockwell^[7, 8] 等人研究表明:自由剪切层的不稳定性对扰动的放大与初始扰动的幅值、马赫数及雷诺数无关,仅取决于扰动的无量纲频率 Strouhal 数

$$S_0 = (f_0 L) / u_0 \quad (2)$$

式中 f_0 为扰动频率, Hz

定义射流振荡的无量纲频率 Strouhal 数为

$$S_L = (fL) / u_n \quad (3)$$

考虑到气泡存在使水中的波速变小,在空隙度达到一定值时波速可能与射流的初始速度 u_0 在同一数量级,因此在计算扰动波向上游和下游传播速度时不应将射流的速度忽略,由式(1)、(3)得

$$S_L = \frac{n}{u_0 / \left(\frac{1}{a - u_0} + \frac{1}{a + u_0} \right)} = \frac{2na}{u_0(a^2 - u_0^2)} \quad (4)$$

2 振荡腔内射流中的波速

如上所述,振荡腔内流体中除了含有固体磨料颗粒外,还有空气、属气、液、固三相流。认为磨料粒度很小,可在射流中均匀分布。空泡的惯性小,可认为是与周围水介质的流速同步变化。而固体磨料的惯性较大,

无论在稳定流状态还是流速变化的不稳定流状态,射流中磨料的流速都滞后于周围流体水和气泡。假设:

- 1) 射流中液、气两相具有平均物理特性,视它们为单一流体,不考虑其间相对运动;
- 2) 射流中磨料粒度很小,其速度滞后于周围流体的速度;
- 3) 压力波在振荡腔内只有纵向运动;
- 4) 摩擦阻力忽略不计,系统为等温过程。

选振荡腔内长 ΔL 、截面积 $A = A(\Delta p)$ 的射流为控制段,压力波引起的压强增量为 Δp ,假定压力扰动经过控制段的时间为 Δt ,即压力扰动波速为 $a_m^* = \Delta L / \Delta t$ 。磨料、水(气)的速度变化量分别为 $\Delta u_i, \Delta u_{ik}$,则混合流体的连续方程和动量方程为

$$[a_i \Delta u_i + (1 - a_i) \Delta u_{ik}] A \Delta t = \Delta V_i + \Delta V_l + \Delta V_g + \Delta V_p \quad (5)$$

$$A \Delta p \Delta t = \rho_s \alpha_s A \Delta L \Delta u_i + \rho_{ik} (1 - \alpha_i) A \Delta L \Delta u_{ik} \quad (6)$$

$$\rho_{ik} = \alpha_k \rho_k + (1 - \alpha_k - \alpha_i) \rho_l \quad (7)$$

式中: a_i, α_k 分别为射流中磨料的体积浓度和气泡的空隙度; $\rho_s, \rho_l, \rho_k, \rho_{ik}$ 分别为磨料、水、气及水气混合物的密度, kg/m^3 ; $\Delta V_i, \Delta V_l, \Delta V_g$ 分别为控制段内由压力增量引起的磨料、水和气泡的体积增量, ΔV_p 为压力增量作用下由于流体边界的膨胀性引起的控制段的体积增量, m^3 。

体积增量 $\Delta V_g, \Delta V_l, \Delta V_i$ 可由气体、液体、固体的体积弹性模量 K_g, K_l, K_s 的定义给出

$$\Delta V_g = \frac{\Delta p}{K_g} \alpha_g A \Delta L \quad (8)$$

$$\Delta V_l = \frac{\Delta p}{K_l} (1 - \alpha_i - \alpha_k) A \Delta L \quad (9)$$

$$\Delta V_i = \frac{\Delta p}{K_i} \alpha_i A \Delta L \quad (10)$$

体积增量 ΔV_p 由下式给出

$$\Delta V_p = \frac{\Delta p A \Delta L}{D_m} \quad (11)$$

式中: $D_m = dp / (dA / A)$, 为振荡腔内混合流体边界的膨胀模量, Pa, 它与振荡腔室结构、大小以及流体的流速、压力等有关,可由实验测得, K_i / D_m 表示射流边

界挠度,若考虑存在于单位体积中的自由气体质量为 m ,并受到等温压缩, $K_g = p$,则

$$a_g = \frac{mRT}{p} \quad (12)$$

式中: R 为气体常数,对空气 $R = 287.06 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; T 为绝对温度, K ; p 为射流初始压力, Pa .

压力振荡可波及射流轴心,故可近似假定混合流体中冲量按体积分配^[9],即

$$a_s A \Delta P \Delta t = \rho_s a_s A \Delta L \Delta u_s \quad (13)$$

$$(1 - a_s) A \Delta P \Delta t = \rho_{lg} (1 - a_s) A \Delta L \Delta u_{lg} \quad (14)$$

由以上两式及波速定义可得

$$\Delta u_s = (\Delta p) / (\rho_s a_s) \quad (15)$$

$$\Delta u_{lg} = (\Delta p) / (\rho_{lg} a_{lg}) \quad (16)$$

由式(5)~(11)及式(15)、(16)化简即得混合流体中压力扰动波速

$$a_m = \sqrt{\frac{\left(\frac{a_s}{\rho_s} + \frac{1-a_s}{\rho_{lg}}\right) K_t}{1 - a_s - a_g + \frac{K_l}{K_s} a_s + \frac{K_l}{K_g} a_g + \frac{K_l}{D_m}}} \quad (17)$$

由上式可知,自激振荡脉冲磨料射流中压力扰动波的波速与混合流体中磨料、水、气泡的体积弹性模量、浓度、密度及系统压力和腔室内射流的边界特性有关。也就是说扰动压力波的传播是由混合流体的压缩性和流体边界的膨胀性决定的。

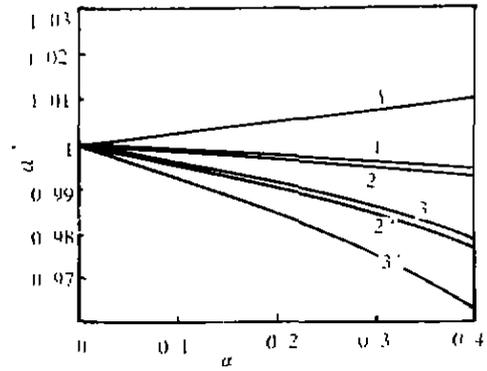
3 结果分析

为了便于分析,定义一无量纲波速 a^* ,它是 a_m 与清水的波速 a_0 之比

$$a^* = \frac{a_m}{a_0} = \left[\frac{a_s \left(\frac{K_l}{K_s} - 1\right) + a_g \left(\frac{K_l}{K_g} - 1\right)}{1 + \frac{K_l}{D_m}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[a_s \frac{\rho_l}{\rho_s} + (1 - a_s) \frac{\rho_l}{\rho_{lg}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

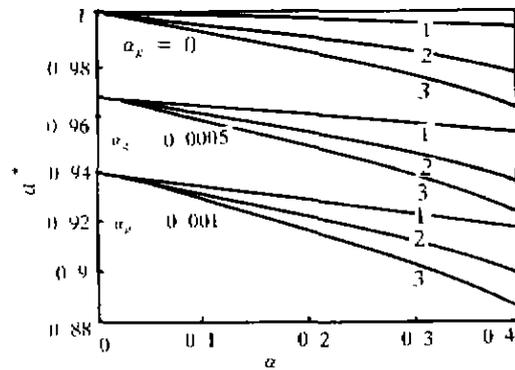
从上式可见, a^* 是气、固两相的体积浓度 a_s 、 a_g , 相对密度 ρ_s/ρ_l 、 ρ_{lg}/ρ_l , 相对体积弹性模量 K_s/K_l , K_g/K_l 和射流边界挠度 K_l/D_m 的函数。

为了分析各物理特性对自激振荡脉冲磨料射流中压力扰动波的波速的影响,假定射流边界挠度 $K_l/D_m = 0.5$, $p = 10 \text{ Mpa}$,取三种常用磨料进行分析,它们与水的密度比 ρ_s/ρ_l 分别为:硅砂 2.65,金刚石 3.20 和 石榴石 3.80,进行数值计算,结果如图 2~5 所示。



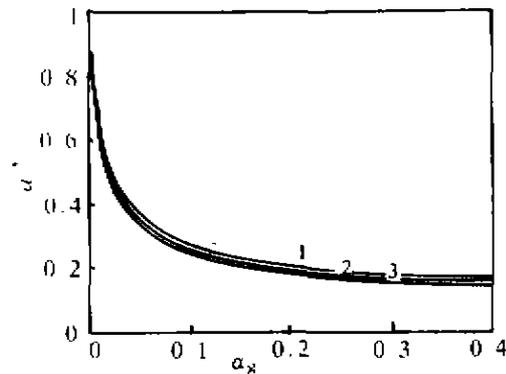
1— $\rho_s/\rho_l = 2.65, K_s/K_l = 100$; 2— $\rho_s/\rho_l = 2.65, K_s/K_l = 10$;
3— $\rho_s/\rho_l = 3.20, K_s/K_l = 100$; 4— $\rho_s/\rho_l = 3.80, K_s/K_l = 100$;
5— $\rho_s/\rho_l = 3.20, K_s/K_l = 10$; 6— $\rho_s/\rho_l = 3.80, K_s/K_l = 10$;

图 2 波速 a^* 随磨料体积浓度 α_s 的变化关系



1— $\rho_s/\rho_l = 2.65$; 2— $\rho_s/\rho_l = 3.20$; 3— $\rho_s/\rho_l = 3.80$

图 3 波速 a^* 随磨料体积浓度 α_s 及空隙度 α_g 的变化关系

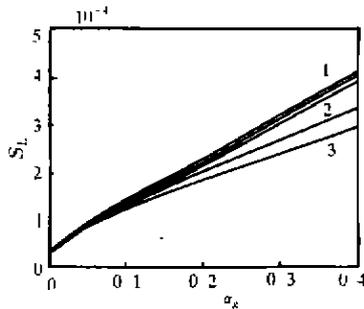


1— $\alpha_s = 0$; 2— $\alpha_s = 0.15$; 3— $\alpha_s = 0.30$

图 4 波速 a^* 随空隙度 α_g 的变化关系

图 2 所示波速 a^* 随磨料浓度 α_s 的变化关系中 K_s/K_l 分别取 100 和 10, $\alpha_g = 0$ 。计算表明,磨料的参数对波速有影响,但总体上对波速影响幅度很小。波速一般随磨料的浓度增大而减小,密度大时减小的趋势明

显,相同密度下体积弹性模量小时波速减小的趋势较明显。这是由于磨料浓度高则混合流体的惯性大,对扰动压力波的传播阻碍作用较大,同样,密度大的固体磨料惯性也较大;体积弹性模量小,磨料对压力波的响应较明显,易产生体积压缩变形而缓冲压力波的传播,所以图中曲线 1 的密度小而且体积弹性模量较大,对波速影响很小,曲线略有上扬的趋势。



1— $\alpha_s = 0.3$. 2— $\alpha_s = 0.15$. 3— $\alpha_s = 0$

图 5 振荡频率 S_L 随空隙度 a_g 及磨料浓度 α_s 的变化关系

取 $K_s/K_l = 10$, 得出波速不同磨料密度时波速 a^* 随磨料体积浓度 α_s 及空隙度 a_g 的变化关系如图 3 所示。由图可见,射流中气体的存在对波速影响很大,波速随空隙度的增大而减小,即使在空隙度很小时趋势也很明显。这是由于气体的弹性模量远小于固体和液体,因此尽管气体量很少,对压力波的影响却很大。T.S. Kobori 等人研究表明,即使清水中气体含量很少,仅 0.1%,波速可减小一半^[10]。从图 3 中还可看出,相同空隙度下磨料参数对波速的影响规律与图 2 一致。

取 $K_s/K_l = 10$, ρ_s/ρ_l 分别取 2.65, 3.20 和 3.80 得出波速 a^* 随空隙度 a_g 的变化关系如图 4 所示。可见,气体对固液两相流波速的影响亦和气体对清水波速影响大体一样,波速随气体量的增加而急剧减小,尤其是曲线的初始段下降很明显。与图 2 和 3 相一致,相同空隙度时磨料浓度高时波速低。同样,由于磨料参数对波速影响很小,图中曲线 2 和 3 中磨料密度不同的三条曲线基本重合,磨料浓度的影响也很小,曲线 1、2、3 很接近。

图 5 为与图 4 的波速相对应的射流振荡频率 S_L 随空隙度 a_g 及磨料浓度 α_s 的变化关系。计算表明,波速的变化对射流的振荡频率有较大的影响,频率随波速的减小而明显增大。相同气体量下磨料密度大、浓度高,体积弹性模量小时,频率较高,与图 2 的结果相对应。同样,磨料参数对振荡频率的影响也很小,曲线 1、

2 中代表不同磨料的三条曲线接近重合,曲线 1、2、3 也很接近。

3 结论

1) 自激振荡脉冲磨料射流的冲蚀效果直接受其振荡频率的影响,而振荡腔内扰动压力波速对射流振荡频率影响很大;

2) 磨料的参数(浓度、密度、体积弹性模量)对波速有影响,但影响幅度很小;

3) 射流中气体的存在对射流中波速影响很大,少量的气体就会使波速降低很大;

4) 射流振荡的频率随波速的减小而明显增大。

参考文献:

- [1] JOHNSON V E, CONN A F. Self-resonating Cavitating Jets[C]. the 6th Int. Symp. on Jet Cutting Tech. USA: BHRA, Cranfield, Bedford, UK, 1982. 443~450
- [2] ZHENFANG L, CHUANLIN T. Pulsed Jet Nozzle for Oil Well Jetting Drilling[C]. Proc. 7th American Water Jet Conference. Missouri, USA: Water Jet Technology Association, 1993. 537~548
- [3] TANG CHUANLIN, LI XIAOHONG, LIAO ZHENFANG. The study of oscillation jet nozzle with flow-control oscillator[C]. Proc. 9th American Water Jet Conference. Houston: Water Jet Technology Association, 1997. 335~352
- [4] 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(10): 12~16.
- [5] 李晓红,刘爱林,郑金龙,卢义玉. 自激振荡磨料射流的研究[J]. 中国安全科学学报, 1995, 5(5), 增刊, 161~165
- [6] SAMI S, ANDERSON C. Helmholtz Oscillator for the Self-modulation of a Jet[C]. Proc. 7th Int Symp on Jet Cutting Technology, BHRA Cranfield Bedford, UK, 1984. 165~170
- [7] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review: Self-sustaining Oscillations of Flow Past Cavities[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1978, 100: 152~165
- [8] ROCKWELL D. Prediction of Oscillation Frequencies for Unstable Flow Past Cavities[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1977, 99: 294~300
- [9] 费祥俊. 浆体及粒状物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 283~284.
- [10] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid Transients[M]. New York: MacGraw-Hill Inc. 1978: 6~7

(下转 20 页)

Planner for Assembly Automation [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation 1996, 401-406.

[6] ROBERTO C, ENRICO C. Forward Assembly Planning Based on Stability [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1997, 19: 411-436

Automatically Assembly Sequence Planning Based On Genetic Algorithms

LIAO Xiao-yun¹, CHEN Xiang-feng²

(1 College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Dept. of Mechanical Engineering, The Hongkong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, HongKong)

Abstract: A modified genetic algorithm for automatically assembly sequence planning is presented in this paper. The assembly direction sets of parts in structure are built to evaluate a assembly sequence without collisions. Five genetic operators are proposed. The fitness of sequence is calculated by its reorientation number, and a fitness scaling scheme is used to overcome premature termination. Example is provided to demonstrate the performance of this algorithm.

Key words: assembly planning; genetic algorithms; geometric constraints

(责任编辑 成孝义)

* * * * *

(上接7页)

Effects of Wave Speed on Frequencies of the Self-excited Oscillation Pulsed Abrasive Water Jets

YANG Lin, LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng, LU Yi-yu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The effects of cavitation and abrasive acceleration in the self-excited oscillation pulsed abrasive water jets are directly determined by its oscillating frequencies, so the wave speed in the jets and its effects on pulsed frequencies are discussed. The numerical results show that the oscillating frequencies of the jets increase obviously with decreasing wave speed, and the abrasive parameters have almost no effects on the wave speed, whereas the exit of air in fluid has significant consequences on the wave speed. It was found that these conclusions were applicable for design the nozzle of the jets.

Key words: self-excited oscillation; abrasive water jet; wave speed; oscillating frequency

(责任编辑 成孝义)