

文章编号:1000-582X(2009)03-0299-04

## 淹没磨料射流的空蚀能力分析

向文英<sup>a</sup>, 李晓红<sup>b</sup>, 卢义玉<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 资源与环境科学学院, 重庆 400030)

**摘要:**淹没磨料射流的空蚀能力决定着磨料射流在水下切割能力的强弱。采用高压密闭容器模拟水下环境, 利用磨料射流系统、数码摄像系统, 实验研究了淹没磨料射流的紊流特性, 进行了空蚀能力的理论分析。探讨了淹没磨料射流紊流系数随泵压、围压的变化规律。研究表明, 文丘里型空化喷嘴的射流系统中, 相同条件下, 5 MPa 以上淹没磨料射流的空化数较纯水空化射流大, 磨料的存在使淹没磨料射流空蚀能力降低。

**关键词:**紊流; 淹没磨料射流; 空化; 空蚀能力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

## Cavitation capacity of submerged abrasive water jets

XIANG Wen-ying<sup>a</sup>, LI Xiao-hong<sup>b</sup>, LU Yi-yu<sup>b</sup>

(a. College of Urban Construction and Environmental Engineering;

b. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University,  
Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The incising ability of abrasive water jets submerged under water depend on their erosive capability. The turbulent flow characteristics of submerged abrasive water jets is experimented with using a system of abrasive water jets in a high-pressure obturation container and a numeric photography system. The erosive capability of submerged abrasive water jets also is analyzed theoretically. We discuss the turbulence coefficient changes at various pump and ambient pressures. The results show that, under identical conditions, the extent of cavitation of submerged abrasive water jets exceeds that of cavitation water jets when the pressure is more than 5 MPa in a Wenqiu cavitation nozzle system. The cavitation ability of submerged abrasive water jets decreases due to the existence of abrasive particles.

**Key words:** turbulence; submerged abrasive water jets; cavitation; erosion capability

磨料射流不但用于高强度材料的切割, 还可用于带涂料油管等难清洗物体的清洗。磨料射流大大地提高了射流的品质 and 工作效率。同时磨料射流在海底资源开采、水下切割中已逐渐得到应用<sup>[1-4]</sup>。然而, 淹没状态下磨料射流的工作面常常出现麻点, 即出现了空蚀现象, 从而整个流动成为液、气、固多相流动, 这使得淹没磨料射流的理论研究变得极其复

杂<sup>[5-8]</sup>。由于这种射流形式空化现象在其空化喷嘴中形成, 出流后伴随有空泡云的磨料射流的紊流特性发生变化, 对靶件的空蚀破坏能力也出现了明显的不同, 就其根本的原因在于淹没磨料射流的空蚀能力发生了变化。目前国内外对此研究甚少<sup>[8-9]</sup>, 为探讨淹没磨料射流的空蚀破坏机理, 实验研究了淹没磨料射流的空蚀能力。

收稿日期: 2008-11-16

基金项目: 国家自然科学基金工作者基金资助项目(50604019); 国家自然科学基金专项创新研究群体基金资助项目(50621403)

作者简介: 向文英(1965-), 女, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事高压水射流理论、水力学与水文学、河流动力学方向的研究, (Tel)023-65124369; (E-mail)xwy829@126.com。

### 1 淹没磨料射流紊流特性

在淹没磨料射流中,射流扩散角  $\theta$  与紊流系数成如下关系<sup>[10-11]</sup>

$$\tan\theta = \frac{R}{x} = a\varphi, \quad (1)$$

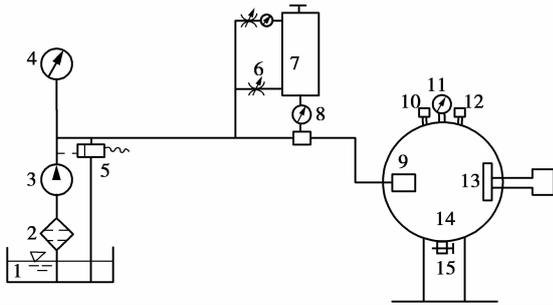
其中,  $R$  为射流断面半径,  $R = a\varphi x = x \tan\theta$ ;  $a$  为紊流系数,  $\varphi$  为射流出口的形状系数,圆断面射流  $\varphi = 3.4$ ;  $x$  为该断面距原点距离。则

$$R = 3.4ax, \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{3.4} \tan\theta = 0.294 \tan\theta. \quad (3)$$

在淹没磨料射流中,由于磨粒的存在,流体的紊动强弱产生变化,并使其扩散角度受到影响。这种影响随着泵压、围压、磨料浓度的不同而不同。反映紊动强度的紊流系数  $a$  只能通过实验按式(3)求得。

为研究淹没磨料射流的紊流特性,实验设计前混合磨料射流系统,采用偏心卧式三柱塞泵,输入功率 100 kW,流量 100 L/min,最大压力 35 MPa。采用高压密封罐模拟水下淹没环境,围压 1 MPa 相当于模拟 100 m 水深。系统装置如图 1,喷嘴采用文丘里缩放型空化喷嘴,如图 2。



1. 水池; 2. 过滤器; 3. 柱塞泵; 4. 压力表; 5. 安全阀; 6. 节流阀; 7. 磨料罐; 8. 单向阀; 9. 喷嘴; 10. 排气阀; 11. 压力表; 12. 减压阀; 13. 试件; 14. 高压容器; 15. 排水阀  
图 1 淹没磨料射流系统

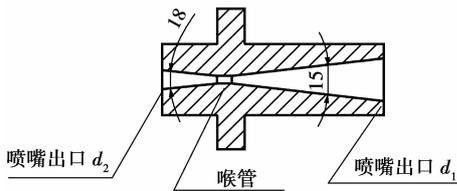
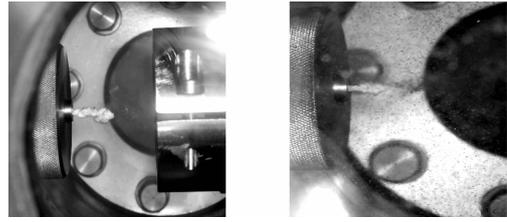


图 2 文丘里型喷嘴结构图

实验在淹没条件下,分别在不同泵压与围压下对纯水空化射流和磨料射流进行对比实验。其中,在淹没磨料射流中,磨料浓度为 3.97%。采用 500 万像素的数码相机拍摄了射流图像(如图 3),通过分析射流图片,确定出射流的扩散角度,按式(3)计



(a) 纯水空化射流 (b) 淹没磨料射流

图 3 淹没射流摄影照片

算紊流系数。

#### 1.1 泵压对紊流特性的影响

在围压 1 MPa 下,改变泵压,从射流图象的分析数据中计算得射流射程在 6 mm 处的扩散角度,计算出紊流系数,可绘出纯水空化射流与淹没磨料射流的紊流系数随泵压变化的影响曲线,见图 4。

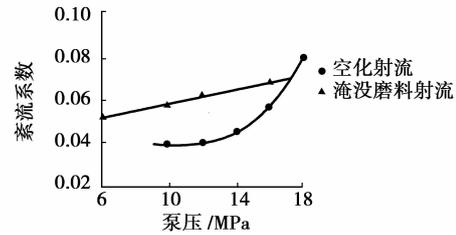


图 4 紊流系数与泵压的影响曲线

图 4 可见,相同泵压下,淹没磨料射流与纯水空化射流相比紊流系数明显增大,且随泵压增加而加大。

淹没磨料射流中,泵压与紊流系数近似直线分布,其相关方程满足下式

$$P_b = 0.0017a + 0.0418, \quad (4)$$

其相关系数  $R^2 = 0.9742$ 。

在纯水空化射流中,泵压与紊流系数成多项式关系,方程为

$$P_b = 0.0009a^2 - 0.0197a + 0.1522, \quad (5)$$

其相关系数  $R^2 = 0.9963$ 。

#### 1.2 围压对紊流特性的影响

采用同样的方法,实验泵压 15 MPa,改变围压,得到射流射程在 6 mm 处的扩散角度,计算得紊流系数。图 5 分别绘出了纯水空化射流与淹没磨料射流中,围压与紊流系数的关系曲线。

根据实验数据统计,淹没磨料射流中,围压与紊流系数近似成多项式关系,满足下式

$$P_{amb} = 0.0071a^2 - 0.0469a + 0.1097, \quad (6)$$

其相关系数  $R^2 = 0.9878$ 。

在纯水空化射流中,围压与紊流系数也近似成多项式关系,方程为

$$P_{amb} = 0.014 3a^2 - 0.076a + 0.107 3, \quad (7)$$

其相关系数  $R^2 = 0.897 8$ 。

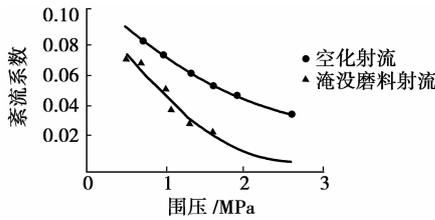


图 5 紊流系数与围压的影响曲线

图 5 反映:相同围压下,淹没磨料射流与纯水空化射流相比紊流系数减少,且随围压增大而减少。

综合分析紊流系数随泵压和围压的特性变化规律,主要原因在于:射流中加入磨粒后使得磨料射流的惯性较纯水大,当受不同压力时磨粒的紊流强度变化剧烈,并带动水体强烈紊动。从而出现泵压力大紊动剧烈,泵压力小紊动弱的现象;而围压变化时则出现相反的现象。磨粒的这种特性最终将直接影响到射流出流后的速度分布和相关的岩石破碎性能,同时使淹没磨料射流的空化效果受到影响。

## 2 淹没磨料射流的空蚀能力分析

文丘里型空化喷嘴的形式决定着喷嘴出口的出流能力,即射流出流流量的大小。其中,收缩段和扩散段角度决定着射流局部阻力的大小,管路系统的长短又制约着沿程阻力的大小,进而决定管路系统的流量系数的大小。

设淹没状态下,下游环境压力为  $p_{amb}$ ,收缩段局部阻力系数  $\xi_1$ 、扩散段阻力系数  $\xi_2$ ,阀门局部阻力系数为  $\xi_3$ ,管路沿程阻力系数为  $\lambda$ ,列管路进口与射流出口的能量方程<sup>[12]</sup>,可求出射流出口的流量  $Q$  与流量系数  $\mu$

$$Q = \frac{\pi d_2^2}{\sqrt{8\rho}} \sqrt{p_b - p_{amb}} \frac{1}{\sqrt{\xi_1 \left(\frac{d_2}{d}\right)^4 + \xi_2 + \xi_3 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^4 + 1 + \left(\frac{d_2}{d_i}\right)^4 \sum \lambda \frac{l_i}{d_i}}} = \mu A_0 \sqrt{\frac{2(p_b - p_{amb})}{\rho}}, \quad (8)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_1 \left(\frac{d_2}{d}\right)^4 + \xi_2 + \xi_3 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^4 + 1 + \left(\frac{d_2}{d_i}\right)^4 \sum \lambda \frac{l_i}{d_i}}}, \quad (9)$$

式中:  $p_b$  为系统泵压力;  $p_{amb}$  为环境压力,即围压;  $\mu$  为管路系统的流量系数,反映射流在整个流动中产生阻力的总影响。同时,由于泵出口至喷嘴出口的高差引起的压强降落  $\gamma\Delta z$  相对较小,且为常数,已忽

略不计。

$d_1$ 、 $d$ 、 $d_2$  分别为喷嘴上游进口、喉管、下游出口的管径。由于局部阻力系数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$  必须用实验求出,实验中可根据实测流量和压力求得淹没射流管路系统的流量系数  $\mu$ 。即

$$Q = \mu A_0 \sqrt{\frac{2(p_b - p_{amb})}{\rho}}, \quad (10)$$

$$\mu = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2(p_b - p_{amb})/\rho}} = \frac{\dot{m}}{A_0 \sqrt{2\rho(p_b - p_{amb})}}, \quad (11)$$

式中,  $A_0 = \frac{\pi d_2^2}{4}$  为喷嘴出口过流断面面积。

式(11)可计算淹没条件下,纯水空化射流的流量系数。同理,在淹没条件不变时,仅仅改变射流介质为磨料射流,带入淹没磨料射流的质量流率  $\dot{m}_s$  和相应密度  $\rho_s$ ,可得淹没磨料射流的流量系数  $\mu_s$

$$\mu_s = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2(p_b - p_{amb})/\rho_s}} = \frac{\dot{m}_s}{A_0 \sqrt{2\rho_s(p_b - p_{amb})}}, \quad (12)$$

式中,  $\rho_s$  为磨料射流的密度,它与磨料颗粒的体积分数有关,  $\rho_s = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_l$ 。其中,  $\alpha_p$  为磨料颗粒的质量分数,  $\rho_p$ 、 $\rho_l$  分别为颗粒与水体的密度。由于颗粒的质量分数对射流的性质与流动特性影响较大,故本文取低浓度( $\alpha_p$  小于 5%)的磨料射流,通常也称之为稀疏多相流动。

在射流系统中,决定空化效果强弱的关键因素为空化数,空化数为抑制空化产生的力与促使空化产生的力之比<sup>[12-15]</sup>,即

$$\sigma = \frac{p_{amb} - p_v}{0.5\rho u_{\infty}^2} = \frac{p_{amb} - p_v}{\mu^2(p_b - p_{amb} - \gamma\Delta z)}, \quad (13)$$

式中,  $p_v$  为饱和蒸汽压强,  $\Delta z$  为喷嘴至水池液面的高差。由于饱和蒸汽压强  $p_v$  和  $\gamma\Delta z$  相对较小,且为常数,决定空化数大小的量主要为泵压力  $p_b$ 、环境压力(围压)  $p_{amb}$  和喷嘴的流量系数  $\mu$ 。有

$$\sigma = \frac{p_{amb}}{\mu^2(p_b - p_{amb})}. \quad (14)$$

因而,在泵压力  $p_b$ 、环境压力(围压)  $p_{amb}$  相同时,空化强弱将直接决定于喷嘴流量系数。为此,采用相同形式的文丘里型空化喷嘴,在围压 1.0 MPa 的实验条件下,改变泵压力,测取纯水空化射流与淹没磨料射流的质量流率。利用式(11)、(12)分别测得纯水空化射流管路系统的流量系数和淹没磨料射流管路系统的流量系数。按式(14)分别算得实验条件下纯水空化射流和淹没磨料射流的空化数,并绘出图 6。

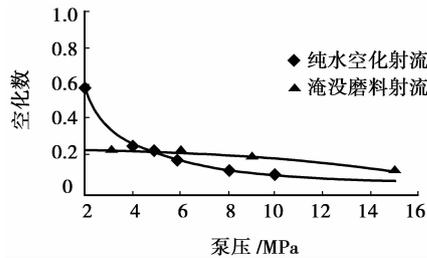


图 6 泵压与空化数关系曲线

图 6 可见,相同条件下,5 MPa 以上淹没磨料射流的空化数较纯水空化射流大,反映出:由于磨料的存在,淹没磨料射流的空蚀能力降低。原因在于淹没磨料射流阻力增大,射流流量系数降低,速度减少,从而促使空化产生的力减少,空化数增大。

根据实验数据,拟合曲线,得出纯水空化射流空化数与泵压的相关曲线,满足方程

$$\sigma = 1.1245p^{-1.0123}, \quad (15)$$

式中,相关系数  $R^2$  为 0.9881。方程反映了纯水空化射流空化数与泵压呈幂函数分布。

淹没磨料射流空化数与泵压的相关曲线满足方程

$$\sigma = -0.0004p^2 - 0.0009p + 0.2463, \quad (16)$$

式中,相关系数  $R^2$  为 0.9832。方程反映,淹没磨料射流空化数与泵压呈多项式分布。

### 3 结 论

通过以上理论分析与实验得到以下结论。

1)不同泵压下,淹没磨料射流与纯水空化射流相比紊流系数明显增大。不同围压下,淹没磨料射流与纯水空化射流相比紊流系数减少。

2)相同条件下,5 MPa 以上淹没磨料射流的空化数较纯水空化射流大,反映出:由于磨料的存在,淹没磨料射流的空蚀能力降低。

#### 参考文献:

- [1] LEROUX J B, ASTOLIFI J A, BILLARD J Y. An experimental study of unsteady partial cavitation [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(1): 94-101.
- [2] BOUME N K, FIEID J E. Cavity collapse in a liquid with solid particles[J]. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1994, 259(4): 149-165.
- [3] 杨玉峰,胡寿根,王宗龙.基于正交实验法的淹没磨料射流冲蚀性能实验研究[J].*力学季刊*, 2006, 27(2): 311-316.  
YANG YU-FENG, HU SHOU-GEN, WANG ZONG-LONG. Erosion performance experimental research of submerged abrasive waterjet based on orthogonal experimental method [J]. *Chinese Quarterly*

*Mechanics*, 2006, 27(2): 311-316.

- [4] 高激飞,胡寿根,宁原林.基于 CFD 的淹没磨料射流的数值模拟与流动特性研究[J].*中国机械工程*, 2003, 14(14): 1188-1190.  
GAO JI-FEI, HU SHOU-GEN, NING YUAN-LIN. Numerical simulation and flow analysis of submerged abrasive water jet based on CFD[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(14): 1188-1190.
- [5] 杨永印,王瑞和,沈忠厚,等.淹没条件下星形喷嘴射流流动特点的实验研究[J].*石油学报*, 2003, 24(2): 109-112.  
YANG YONG-YIN, WANG RUI-HE, SHEN ZHONG-HOU, et al. Experimental study on jet flowfield of star-shaped nozzle under submergent condition [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 109-112.
- [6] LU Y Y, LI X H. Experiments on erosion mechanisms of cavitating waterjets[C]// *The 8th Asian International on Fluid Machinery Conference*, Oct 12-15, 2005, Yichan, China. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2005: 11.
- [7] WEN G C, LU D. Energy consumption in comminution of mica with cavitation abrasive water jet[J]. *China University of Mining & Technology*, 2007, 17(2): 251-254.
- [8] 向文英.淹没射流中磨料与空泡相互关系研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院, 2007.
- [9] LU Y Y, LI X H, ZHANFG F H. Numerical simulation of bubble chaotic motion in a cavitating water jet[J]. *Journal of Chong Qing University*, 2003, 2(1): 91-94.
- [10] STREETER V L, BENJAMIN WYLIE E, BEDFORD K W. *Fluid Mechanics* [M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [11] 闻德荪,李兆年,黄正华. *工程流体力学(水力学)* [M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [12] 沈忠厚. *水射流理论与技术* [M]. 山东:石油大学出版社, 1998.
- [13] JUN I, KENJIRO K. Numerical analysis of cavitating flow of liquid helium in a converging-diverging nozzle[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(1): 749-757.
- [14] LU Y Y, LI X H, LIAO Y, et al. Experiments on deflecting & oscillating waterjet[J]. *Journal of Chongqing University*, 2002, 1(1): 11-15.
- [15] 向文英,卢义玉,李晓红,等.空化射流在岩石破碎中的作用实验研究[J].*岩土力学*, 2006, 27(9): 1505-1508.  
XIANG WEN-YING, LU YI-YU, LI XIAO-HONG, et al. Experimental study of the function of cavitating water jet on rock-cutting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1505-1508.

(编辑 赵 静)