文章编号：1000-5773(2012)05-0590-05

围压条件下空化磨料射流的冲蚀特性与机制分析*

廖华林[1]，牛继磊[1]，易　灿[2]

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院，山东青岛　266580；
2.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室，北京　102249)

摘要：磨料射流在水利水电、石油工程和海洋资源开发等领域有着广泛的应用，研究射流的冲蚀特性和破坏物料机制对提高水射流利用效率具有重要意义。利用自行研制的实验装置，研究了围压条件下自振空化、文丘里和锥形3种喷嘴形成的磨料射流冲蚀特性，分析了空化磨料射流冲蚀物料的机制。结果表明：自振空化喷嘴和文丘里喷嘴的冲蚀效果优于锥形喷嘴，空化作用有助于提高磨料射流的冲蚀效果；磨料射流的冲蚀效率随围压的增大而降低，主要原因是围压对纯水射流和空化磨料射流的压力脉动和冲击力具有抑制作用。分析认为，空化磨料射流冲蚀破碎物料的机制主要包括冲蚀、气蚀和共混磨蚀3种作用。

关键词：磨料射流；空化效应；围压；物料破坏
中图分类号：O358；TP69　　**文献标识码**：A

1　引　言

空化磨料射流思路来自水利水电工程中含砂浑水对水工建筑和设备的共混磨蚀破坏。高水头大流量携砂水流易引起混凝土或金属材料的破坏，其破坏程度比单纯的泥砂磨损或清水空蚀严重得多[1-4]。空化磨料耦合射流涉及到空化射流和磨料射流。空化射流和磨料射流在石油工程中获得广泛应用，如自振空化射流钻头、磨料射流射孔增产等对提高机械钻井速度、增加原油采收率起到重要作用；连续管钻径向水平井技术、水射流深穿透射孔辅助压裂技术[5-6]则利用磨料射流直接冲蚀套管和破碎岩石。如果射流的能量得以充分利用，则冲蚀破碎能力将进一步提高，作业效果也将大幅度增强。此外，随着海洋资源开发利用速度的加快，深水钻井成为国内外重要的发展方向，深水水下切割技术越来越受到关注和重视。在围压条件下，由于单纯的空化射流或磨料射流的冲蚀破碎能力随围压的增大而迅速下降，因此磨料射流的切割能力还有待提高。受设备功率和管路耐压的限制，如何充分利用水力能量，提高水射流的冲蚀切割能力成为重要问题。本工作主要研究围压条件下自振空化、文丘里和锥形3种喷嘴形成的磨料射流的冲蚀特性，分析空化磨料射流冲蚀物料的机制。

2　空化磨料射流的冲蚀特性实验

实验装置主要由喷嘴、靶件安装盒、围压罐体、喷距调节和围压调节等部件组成，如图1所示。冲蚀试件为45钢，试件高100 mm，直径为100 mm(见图2)；喷嘴直径为3.1 mm；磨料为粒径0.4～0.6 mm

* **收稿日期**：2011-01-28；**修回日期**：2011-04-10
基金项目：国家自然科学基金(50904075)；高等学校博士学科点专项科研基金(20070525254)；中央高校基本科研业务费专项资金
作者简介：廖华林(1974－)，男，博士，副教授，主要从事油气井工程与高压水射流技术研究.
E-mail：liaohualin2003@yahoo.com.cn

的细砂。实验主要研究不同冲蚀时间和围压对自振空化、文丘里和锥形 3 种喷嘴形成的磨料射流冲蚀特性的影响,采用冲蚀体积对射流的冲蚀能力和冲蚀效率进行评价。

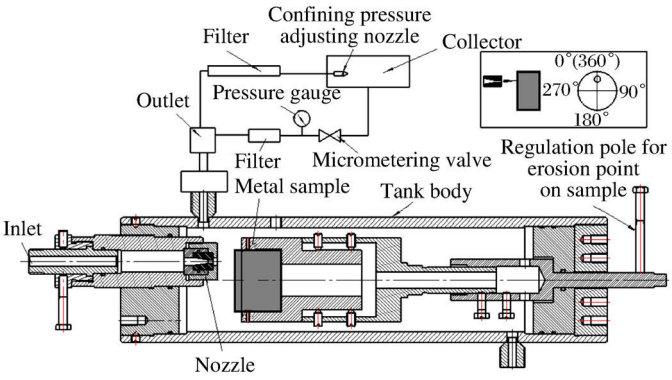


图 1　围压条件下磨料射流冲蚀金属试样实验装置

Fig. 1　Experimental device for abrasive jet eroding the metal samples under confining pressure

2.1　冲蚀时间对磨料射流冲蚀特性的影响

射流压力保持在 20.0 MPa,围压为 2.0 MPa,喷距为 12.0 mm,冲蚀时间 t 分别为 1、2、3 和 4 min 时,3 种喷嘴形成的磨料射流结果如图 3 所示。由图 3 可知:在其它条件保持不变的情况下,3 种喷嘴的冲蚀体积均随时间的增加而增加;冲蚀 3 min 后,冲蚀体积的增长速率减缓;自振空化喷嘴和文丘里喷嘴的冲蚀体积大于锥形喷嘴。



图 2　磨料射流冲蚀后的金属试样

Fig. 2　Metal samples after abrasive jet erosion

2.2　围压对冲蚀效率的影响

将射流压力保持在 20.0 MPa,调节喷距为 12.0 mm,冲蚀时间为 3 min,改变围压进行实验,结果如图 4 所示。由图 4 可知,自振空化喷嘴和文丘里喷嘴冲蚀金属靶件的效率优于锥形喷嘴,这是由于自振空化喷嘴和文丘里喷嘴能够形成空化,当空化产生的空泡破裂时可形成冲击波或微射流,加速了磨料颗粒对靶件的冲击,因而使破坏性得到加强。随着围压的增加,空化磨料射流的空化能力下降,导致射流的冲蚀能力下降。

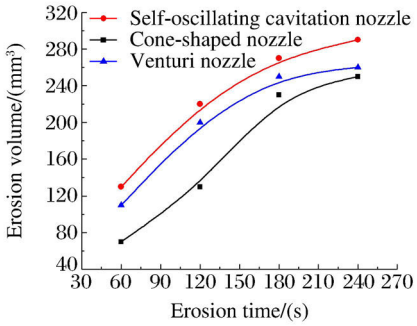


图 3　射流冲蚀时间与冲蚀体积的关系

Fig. 3　The relationship between erosion volume and jet acting time

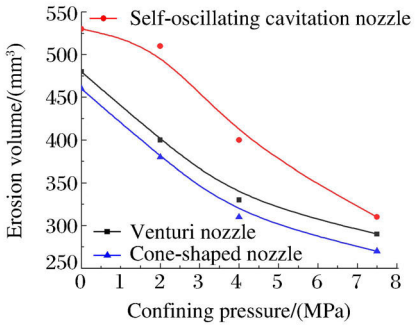


图 4　围压与冲蚀体积的关系

Fig. 4　The relationship between erosion volume and confining pressure

3 空化磨料射流冲蚀物料机制分析

通过分析实验结果可知:空化喷嘴形成的磨料射流的冲蚀效率高于锥形喷嘴,并且随围压的增加,磨料射流的冲蚀效率下降,其主要原因归结于以下两方面。

第一,磨料射流的空化效应有助于提高射流效率。国内外已有研究结果表明[7-8]:考虑到空泡溃灭和回弹阶段冲击波对携带磨料颗粒的影响,当磨料颗粒粒径与泡径之比小于 0.05 时,空泡溃灭时可使磨料颗粒的速度增加 100 m/s 以上,加速了对物料的冲蚀破坏。含有空泡的磨料射流对靶体的冲蚀作用,一方面由高速固体磨料粒子流对靶体表面产生磨削,另一方面因射流空化效应的空泡溃灭而产生空蚀。通过分析射流冲蚀金属靶件的实验结果认为,空化磨料射流打击到材料表面时,除滞止压力、磨料的高频冲蚀和磨削外,还伴随有很高的气蚀、水锤压力、剪切应力、微射流和楔劈等多重作用,加剧了被冲击材料表面的破坏。空化磨料射流对物体材料的破坏过程和破坏机理极其复杂,不仅与射流及作用条件有关,而且与作用材料的性质密切相关。结合纯水空化射流、纯水磨料射流和三相磨料射流作用下材料的破坏机理[9-14],认为空化磨料射流冲蚀物料的机制主要包括冲蚀、气蚀和共混磨蚀 3 方面作用。(1) 冲蚀作用。当空化磨料射流高速打击材料时,对材料表面的冲蚀可以看作是射流中大量高速运动的磨料颗粒对材料表面高频冲击导致破坏失效的一种磨损。材料表面在磨料移动时产生接触点的横向塑性流动,从而切出一定数量的微体积材料,冲蚀是垂直冲击变形磨损和水平微切削磨损复合作用的结果。(2) 气蚀作用。空化磨料射流由于空化效应而产生气泡,气泡经历膨胀、压缩和溃灭等阶段,产生强烈的冲击,造成很大的冲击力。若气泡破灭发生在材料表面附近,由于局部压力可达几百甚至上千兆帕,在高频、高压脉冲作用下,材料表面会很快发生断裂和剥落,形成蜂窝状孔洞。(3) 共混磨蚀作用。当空化磨料射流打击材料表面时,冲蚀和气蚀同时存在,交加循环,相互促进。由于射流中磨料颗粒的存在,改变了清水的物化及流动特性,使水的空化压力发生变化。在磨料的冲击和摩擦切削下,材料表面凹凸不平,在原本不产生空蚀的部位形成气蚀源,促进了空化的产生。空泡溃灭时,在冲击压强的反复作用下,使材料产生疲劳破坏,为磨料磨损创造了条件,砂粒磨损和空化空蚀的共同作用加速了材料的破坏。

第二,围压对磨料射流的冲击力和空化效应具有抑制作用。围压除了对水射流的冲击压力具有抑制作用[15]外,还会抑制水射流的空化效应。图 5、图 6 为自振空化喷嘴在纯水射流压力为 30.0 MPa、围压分别为 0.5 MPa 和 6.0 MPa 时空化噪声的时域波形图。由图 5 可知:当围压较低(0.5 MPa)时,波形表现出很好的脉动性,其脉冲频率约为 2.8 kHz,这是因为自振喷嘴能够将连续射流转变成脉冲射流,而脉冲射流的空化噪声信号是脉动的,因而时域信号表现出脉动性。对比图 5、图 6 可知,随着围压的增加,空化噪声的脉动特性减弱,说明围压对射流的脉冲强度具有明显的抑制作用。图 7、图 8 为自振空化喷嘴形成的磨料射流在射流压力为 20.0 MPa、围压分别为 1.0 MPa 和 4.0 MPa 时的时域波形图。可以看出:空化磨料射流具有较好的脉动性;围压为 1.0 MPa 时的声压波动幅度高于 4.0 MPa 时的幅度,说明围压同样会减弱空化磨料射流噪声的脉动特性,对射流的脉冲特性有抑制作用。

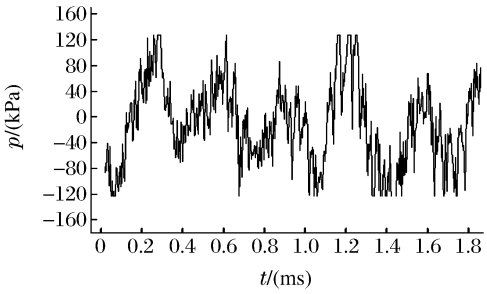


图 5 围压为 0.5 MPa 时纯水自振空化射流的时域波形图

Fig. 5 Time-domain waveform diagram of self-oscillating water jet under 0.5 MPa confining pressure

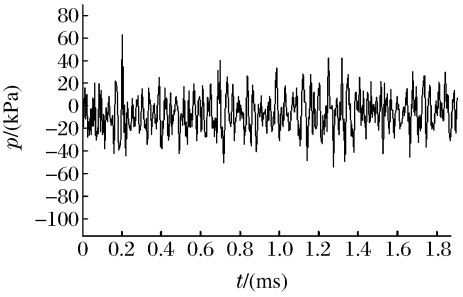


图 6 围压为 6.0 MPa 时纯水自振空化射流的时域波形图

Fig. 6 Time-domain waveform diagram of self-oscillating water jet under 6.0 MPa confining pressure

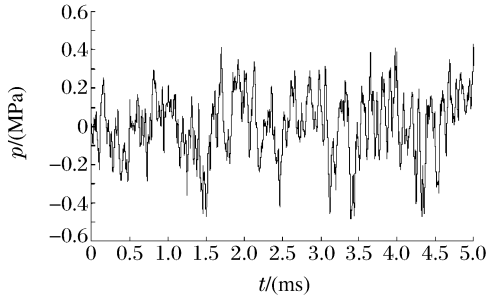


图 7　围压为 1.0 MPa 时空化磨料射流的时域波形图

Fig. 7　Time-domain waveform diagram of cavitation abrasive water jet under 1.0 MPa confining pressure

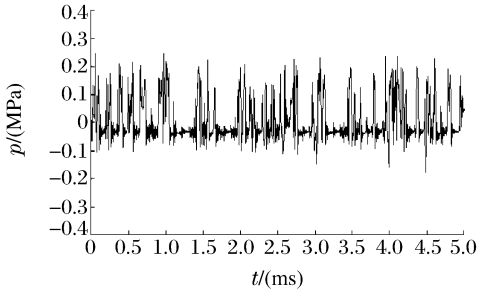


图 8　围压为 4.0 MPa 时空化磨料射流的时域波形图

Fig. 8　Time-domain waveform diagram of cavitation abrasive water jet under 4.0 MPa confining pressure

4　结　论

(1) 自振空化喷嘴、文丘里喷嘴和锥形喷嘴形成的磨料射流冲蚀金属靶件的实验结果表明,自振空化喷嘴和文丘里喷嘴的冲蚀效果优于锥形喷嘴,表明空化作用有助于提高磨料射流的冲蚀效果。

(2) 空化磨料射流对物料的破坏过程和破坏机理极其复杂,不仅与射流及作用条件有关,而且与作用材料的性质密切相关。初步分析认为,空化磨料射流冲蚀破碎物料的机制主要包括冲蚀、气蚀和共混磨蚀 3 种作用。

(3) 磨料射流的冲蚀效率随围压的增大而降低,主要原因是围压对纯水射流和空化磨料射流的压力脉动和冲击力具有抑制作用。

References:

[1] Deng J, Yang Y Q, Shen H R, et al. The influence to abrasion of sediment concentration [J]. Journal of Sediment Research, 2000, (4): 65-68. (in Chinese)
邓　军, 杨永全, 沈焕荣, 等. 水流含沙量对磨蚀的影响 [J]. 泥沙研究, 2000, (4): 65-68.

[2] Huang X B, Yuan Y Z, Wang S X. Analysis of abrasion of wall material by high velocity sediment laden and aerated flow [J]. Journal of Hehai University, 2000, 28(2): 27-31. (in Chinese)
黄细彬, 袁银忠, 王世夏. 含沙掺气高速水流对壁面磨蚀的分析 [J]. 河海大学学报, 2000, 28(2): 27-31.

[3] Chang J S. Cavitation and cavitation erosion of pump and turbine with silt-laden water as working medium [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2): 93-97. (in Chinese)
常近时. 工质为浑水时水泵与水轮机的空化与空蚀 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2): 93-97.

[4] Yang M G, Wang Y L, Kang C, et al. Cavitation and wear in the micro jewel nozzle of ultra-high pressure water jet [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(4): 286-292. (in Chinese)
杨敏官, 王育立, 康　灿, 等. 微型超高压宝石喷嘴内部的空化与磨损 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(4): 286-292.

[5] Bruni M, Biassotti H, Salomone G. Radial drilling in argentina [A]//Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference [C]. Buenos Aires, Argentina, 2007.

[6] Nakhwa A D, Loving S W, Ferguson A. Oriented perforating using abrasive fuids through coiled tubing [A]//Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition [C]. Woodlands, Texas, US, 2007.

[7] Ni H G, He Z G. Impact of shock waves of bubble collapse on solid particles carried by flow fields [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1994, 34(6): 727-731. (in Chinese)
倪汉根, 何子干. 空泡溃灭冲击波对流场携带颗粒的作用 [J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(6): 727-731.

[8] Bourne N K, Field J E. Cavity collapse in a liquid with solid particles [J]. J Fluid Mech, 1993, 259: 149-165.

[9] Toshihiko Y, Kazunori I, Hideaki F, et al. Application of extreme value statistical analysis to marks of water jet peening and presumption of cavitations collapse pressure [A]//The 7th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology [C]. Jeju, Korea, 2003: 395-402.

[10] Xiang W Y, Lu Y Y, Li X H. Experimental study of domino effect on submerged abrasive water jets [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1499-1505. (in Chinese)
向文英, 卢义玉, 李晓红. 淹没磨料射流效应实验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1499-1505.

[11] Lu Y Y, Li X H, Zhang F H. Numerical simulation of bubble chaotic motion in a cavitating water jet [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 2(1): 71-94.

[12] Gong L H, Lu G S, Zhang X X, et al. Study on the damage mechanism under the three-phases abrasive jet [J]. Lubrication Engineering, 2003, (1): 57-59. (in Chinese)
龚烈航, 陆国胜, 张晓鑫, 等. 三相磨料射流作用下材料的破坏机理研究 [J]. 润滑与密封, 2003, (1): 57-59.

[13] Zhang T, Chen C C, Chen F. Research progress of cavitation, silt abrasion and their synergism [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(4): 47-53. (in Chinese)
张 涛, 陈次昌, 陈 丰. 空蚀、磨损及其联合作用研究进展 [J]. 排灌机械, 2006, 24(4): 47-53.

[14] Huang X B, Yuan Y Z, Wang S X. Mechanism of abrasion to material by high-velocity sediment-laden flow and effect of aeration on abrasion resistance [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(1): 1-5. (in Chinese)
黄细彬, 袁银忠, 王世夏. 含沙高速水流的磨蚀机理和掺气抗磨作用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(1): 1-5.

[15] Liao H L, Li L D, Yi C, et al. Experimental study on impact of ambient pressure on water jet kinetics [J]. Science-paper Online, 2009, 4(11): 838-843. (in Chinese)
廖华林, 李立冬, 易 灿, 等. 围压对水射流动力学特性影响的实验研究 [J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(11): 838-843.

Erosion Characteristics and Mechanisms of Cavitating Abrasive Water Jet under Confining Pressure

LIAO Hua-Lin[1], NIU Ji-Lei[1], YI Can[2]

(1. *College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *China*;
2. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*)

Abstract: Abrasive water jet is widely used in water resources and architectural engineering, oil and gas engineering and marine resources development. It is significant to study the erosion characteristics of the jet and material destruction mechanisms to improve the efficiency of water jet. Using the self-developed device, the experiments were performed on abrasive water jet erosion characteristics formed by three types of nozzles including self-oscillating cavitation nozzle, Venturi nozzle, and cone-shaped nozzle under confining pressure. Destruction mechanisms of metal material were also analyzed. The results show that the erosion efficiencies of the self-oscillating cavitation nozzle and Venturi nozzle are higher than that of the cone-shaped nozzle; cavitation erosion can help improve the efficiency of abrasive water jet. Abrasive water jet erosion efficiency decreases with the confining pressure increasing, mainly due to the confining pressure inhibiting pressure pulse, cavitation effect, and impinging pressure. The mechanism of materials by cavitating abrasive water jet includes three roles of impact erosion, cavitation and their synergism.

Key words: abrasive water jet; cavitation effect; confining pressure; material damage