文章编号：1000-5773(2010)04-0286-07

微型超高压宝石喷嘴内部的空化与磨损*

杨敏官，王育立，康 灿，喻 峰

（江苏大学能源与动力工程学院，江苏镇江 212013）

摘要：宝石喷嘴是影响超高压水射流切割系统工作效率的重要部件，而宝石内部的空化直接影响射流的形成，也是宝石磨损的重要原因之一。对 400 MPa 压力范围内宝石孔内部的空化两相流进行了数值模拟，阐述了射流在宝石内的形成过程，分析了长径比、压力和入口形状对宝石内空化的影响，并在相应压力下对宝石喷嘴的磨损进行了实验研究。结果表明：宝石内部的空化发展程度随着长径比的增大而减弱；在一定的长径比范围内，空化可以发展到喷嘴出口，并最终使射流的初始直径小于喷嘴直径，且在此条件下当压力升高时，射流的初始直径增大；良好的入口形线可以降低空化的发展程度；宝石入口的磨损较出口更显著，空蚀和高压水的冲蚀造成了宝石孔边缘形状的破坏，这种破坏随着压力的升高而加剧，选择合适的长径比是减少冲蚀磨损的有效途径。

关键词：超高压水射流；宝石喷嘴；空化；磨损

中图分类号：TP69；O521.9 **文献标识码**：A

1 引 言

水切割技术是高压水射流技术的重要分支，近年来得到了快速发展。随着高压发生器增压能力的逐步提升，射流的切割能力也得到了大幅度增强。目前，具有 300 MPa 以上增压能力的超高压水切割系统几乎可以切割任何材料，加之水切割具有无热反应区、切割速度快、低污染等优点，这项前沿技术在工程中得到了广泛应用，并受到了学者们的关注[1-9]。

水切割过程中，超高压喷射设备在产生高速射流的同时也加速了自身的损耗，因此，喷射设备的寿命较短是现今水切割技术的主要缺陷。宝石喷嘴是将高压水转化为高速射流的终端装置，其孔径小、承载压力大，是水切割设备中最易损坏的部件之一，其结构如图 1 所示。宝石喷嘴内部的流动情况直接影响到射流的形成，是决定水切割效率及设备损耗程度的关键性因素。但是由于高速高压的特殊环境，目前对超高压水射流喷射设备的内部流动研究还处于相对缺乏的状态。

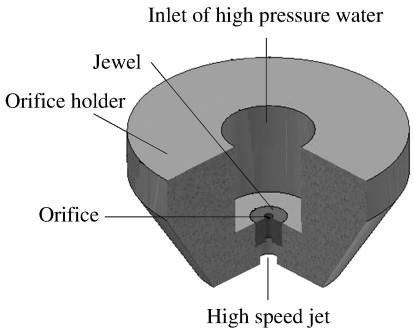


图 1 超高压宝石喷嘴的典型结构

Fig. 1 A typical structure of jewel nozzle for ultra-high pressure water jet

为研究超高压力下宝石喷嘴的内部流动，分析其对宝石磨损和射流的影响，本研究对 200～400 MPa的运行

* **收稿日期**：2009-06-22；**修回日期**：2009-09-08

基金项目：国家自然科学基金(50806031)

作者简介：杨敏官(1952－)，男，教授，博士生导师，主要从事流体机械性能及高压水射流技术研究. E-mail：mgyang@ujs.edu.cn

通讯作者：王育立(1984－)，男，硕士研究生，主要从事高压水射流技术及相关设备性能研究. E-mail：zcjwyl@163.com

条件下宝石喷嘴内部的空化流动进行数值计算,并针对该压力范围内喷嘴的磨损进行实验研究。

2　喷嘴内部空化流动的数值模拟

2.1　空化的判据

空化数是描述空化过程相似度的主要判据。喷嘴内流动的空化数 σ 为

$$\sigma=\frac{p_1-p_v}{p_1-p_2} \tag{1}$$

式中:p_1、p_2 分别为喷嘴上游和下游的压力,p_v 为水的当地汽化压力。在超高压水切割作业中,宝石喷嘴的上游压力接近增压系统的输出压力,而下游压力与大气压相近,因此本研究的空化数 σ 近似为 1。

空化发生在射流形成之时,对射流结构具有显著影响。由于在微小孔径喷嘴内部形成了高速高压的特殊环境,目前尚无法对这种空化流动进行可视化研究,因此数值模拟是研究此类问题的有效途径。

2.2　数值模型

利用 Fluent 6.3 中的 Mixture 多相流模型,计算空化发生后喷嘴内部的气液两相流动,控制方程组可以表达成以下形式。

连续性方程

$$\frac{\partial\rho_m}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m v_{mi})=0 \tag{2}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_{mi})+v_{mi}\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m v_{mj})=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu_m\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_{mi}}{\partial x_j}+\frac{\partial v_{mj}}{\partial x_i}\right) \tag{3}$$

空泡体积分数方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\alpha_v)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m v_{vi}\alpha_v)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\eta\frac{\partial\alpha_v}{\partial x_i}\right)+S_v \tag{4}$$

式中:下标 m 和 v 分别代表混合物和汽化水,i、j 为张量下标,α_v 为空泡体积分数,μ_m 为混合物粘度,ρ_m 为混合物密度,v 为速度,p 为压力,η 为质量转换系数,源项 S_v 用于模拟空泡的产生和溃灭过程。对于 S_v,引用 Rayleigh-Plesset 方程:考虑到流速很大,可以忽略表面张力的影响;由于喷嘴内部的收缩降压流动过程是一个降温过程,对于稳定流动,温度降低是一个恒量,所以可不考虑温度的影响。源项可表达为

$$S_v=4\pi\rho_v N r^2 A \tag{5}$$

其中

$$r=\left(\frac{3\alpha_v}{4\pi N}\right)^{1/3} \tag{6}$$

$$A=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} & p_v>p\\ -\sqrt{\dfrac{2(p-p_v)}{3\rho_l}} & p_v<p\end{cases} \tag{7}$$

式中:下标 l 代表液态水;r 为空泡半径;N 为单位空间内的空泡数量,根据 N. Anantharamish 等人[10]的研究,将 N 设为 $1.5\times10^{10}\ \mathrm{m}^{-3}$。

以图 1 中的超高压宝石喷嘴作为物理模型,其长度均为 1.2 mm。计算中,使用 Realizable k-ε 湍流模型,高压水温度为 32 ℃,这与实验测量结果一致。采用 SIMPLEC 算法实现压力和速度的耦合,使用 QUICK 格式将空泡体积分数离散,对压力进行二阶插值,其它方程均采用二阶迎风格式。

2.3　计算结果及分析

2.3.1　空化的发展过程

宝石喷嘴内的空化首先在宝石孔的入口端部发生。当高压水由高压管路进入宝石孔时,由于流道

断面的突然收缩,高压水发生脱流,流动暂时脱离壁面,在壁面附近形成低压区;当孔内流速足够大时,低压区的压力降至当地汽化压力以下,因此当流动重新接触壁面时,部分水流入低压区形成回流,空化亦随即发生,如图 2 所示。剧烈的空化随着喷嘴内的高速流动向喷嘴出口逐渐发展,经过一段时间,空化区域将延伸至出口界面,如图 3 所示。

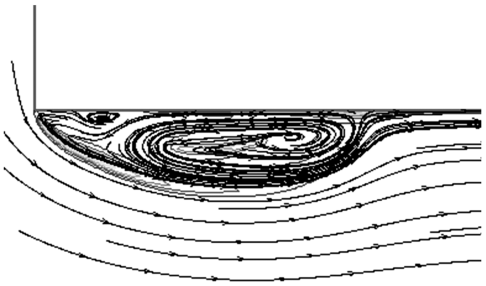


图 2 空化发生时宝石入口的流动

Fig. 2 Flow in the jewel inlet as cavitation happens

上述的空化过程使喷嘴出口附近的流动沿径向被分为 3 个不同的区域:壁面附近区域,区域内空泡体积分数最大;轴线附近的中心区域,区域内没有发生空化,基本为液态水,构成了射流的核心部分;介于这两个区域之间的过渡区域,区域内是空泡和液态水的混合,构成了射流的外围部分,如图 4 所示。值得注意的是,当空化区域发展至出口时,将吸入外界空气,使内部空化停止,最终该区域将充满空气,射流与喷嘴壁面分离,这种现象导致最终射出的射流直径略小于宝石喷嘴直径,削弱了壁面对射流的扰动。由此可见,空化的发展过程在一定程度上也起到了缩小射流直径、增强射流稳定性的作用,同时液壁分离也起到减小冲蚀的作用。

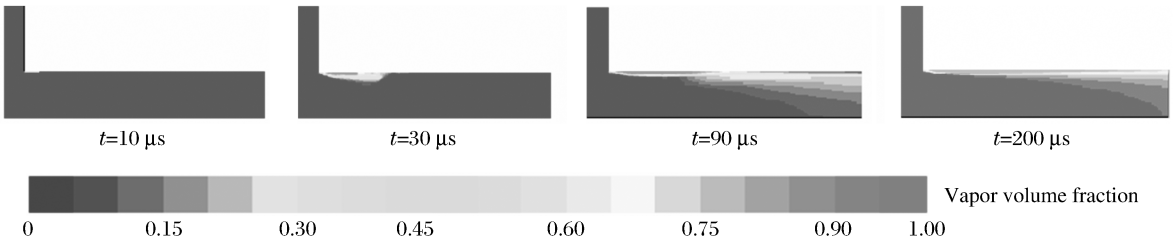


图 3 宝石孔内汽化水的体积分数随时间的变化(p=400 MPa)

Fig. 3 The vapor volume fraction at different time points (p=400 MPa)

2.3.2 喷嘴长径比对空化的影响

分别对 SP7 系列中 3 种不同规格喷嘴的空化进行稳态计算,宝石孔直径分别为0.25、0.3和0.4 mm,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出:相同压力下,长径比(L/D)对喷嘴内空化的发展具有显著影响;长径比为 3 或 4 时,喷嘴出口处的空泡体积分数非常小,且随着长径比增大,空泡密集区域的长度缩短。因此,只有当长径比选择适当时,空化才有可能起到上述的积极作用,而在空化发展至出口使气体倒灌入空化区之前,以及在空化没有发展至出口的情况下,空化区内的紊流对射流产生很强的扰动。

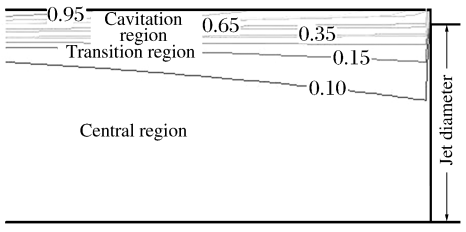


图 4 空化稳定时喷嘴出口附近气相体积分数等值线图

Fig. 4 Contours of the vapor volume fraction near the nozzle outlet in the stable phase of cavitation

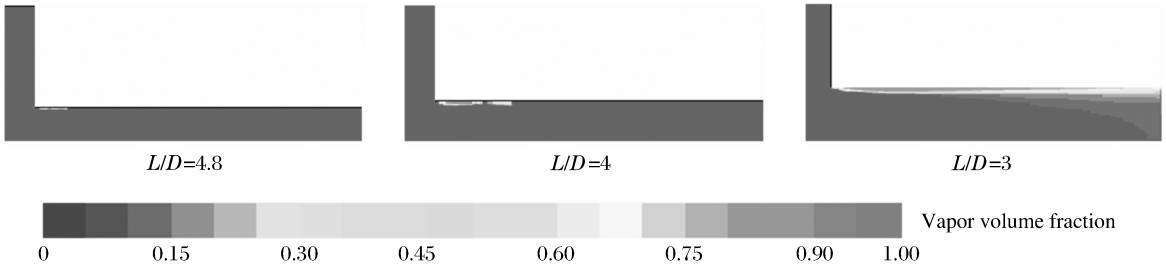


图 5　不同长径比喷嘴内部的空化(p=400 MPa)

Fig. 5　Cavitation in nozzles with different aspect ratios (p=400 MPa)

2.3.3　压力对空化的影响

高压系统的输出压力直接影响到宝石喷嘴内的空化。当压力升高时,孔内空化变得更为剧烈,射流受到空化区的扰动更强。值得注意的是:在空化发展至出口的情况下,空化区域的径向范围缩小,如图 6所示(图中将液相体积分数为 0.9 作为空化区域与过渡区域的分界,R 为射流直径)。从图中可以看出,压力升高后,射流直径增大。这是由于喷嘴内外压降增大后,内部的流速增大,使得空化沿轴向发展至喷嘴出口的时间缩短,同样的,空化区域沿径向发展的时间缩短,发展程度降低。因此,当空气灌入空化区域形成气团并造成液壁分离时,壁面与射流之间的间隙变小。

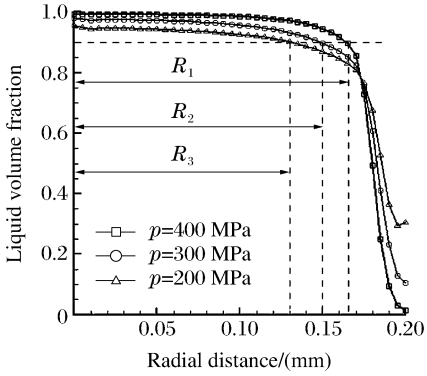


图 6　不同压力下喷嘴出口处的液相体积分数

Fig. 6　Water volume fraction in the nozzle outlet under different pressures

2.3.4　入口形状对空化的影响

宝石孔的入口形线对空化的影响非常显著,如图 7 所示。直角型入口的加工成本较低,工艺易于实现,是现阶段主要采用的入口类型,但是这种入口会在断面变化时造成脱流并产生回流,空化发展程度也最高。圆角型入口具有最佳的流线,使流道断面在收缩时产生一个平稳过渡,回流程度降低,空化影响区域也最小,但是目前要在微型宝石孔上加工出这样的形线还很困难。折中的方案是将入口加工成倒角型,这样就可以有效地削弱空化的影响、减少磨损,但是这种入口形线虽可以实现,但加工难度及成本均大幅提高。此外,倒角型和圆角型宝石孔内部的空化区域均不会发展至出口,因而也就起不到缩小初始射流直径的作用。综合考虑以上因素,直角型在目前还是比较理想的入口形线。

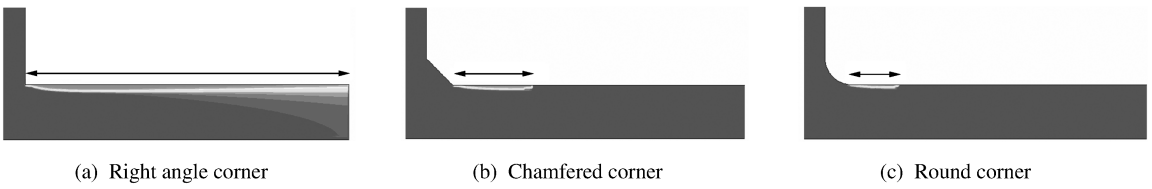


图 7　不同入口形线的喷嘴内的空化区域(p=400 MPa)

Fig. 7　Cavitation zone of nozzle with different inlet shapes (p=400 MPa)

3　宝石喷嘴的磨损实验

宝石喷嘴内部空化产生的空泡在壁面溃灭时产生压力波,对喷嘴内壁造成破坏,与高压水的冲蚀作

用一样，是宝石磨损的重要原因。为研究宝石喷嘴的磨损及外部射流对其产生的影响，对 400 MPa 压力范围内宝石内部的磨损及宝石孔形成的射流进行了实验研究。考虑到蓝宝石与红宝石的主体成分及晶体形态相同，硬度、比重等物性基本一致，两种宝石喷嘴内的流动及受损机理具有很高的一致性，因此实验中使用 SP7 型红宝石喷嘴作为代表，采用直角型宝石孔入口，如图 8 所示。

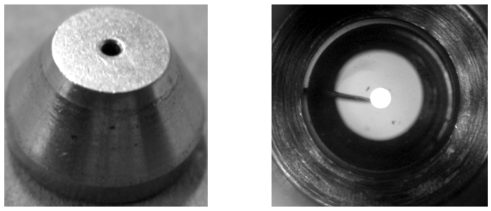


图 8 实验中使用的宝石喷嘴

Fig. 8 Jewel nozzle in the experiment

实验中以宝石孔入口处的磨损情况来判定喷嘴的磨损程度。这是因为：无论是何种长径比的喷嘴，入口端部均是空化发生的位置，而且，在空化能发展至喷嘴出口的条件下，喷嘴形成稳定射流时，空化停止且喷嘴内液壁分离，这使得下游壁面受到的冲蚀大大减弱，因此在持续作业时，宝石喷嘴的磨损主要体现在入口的冲蚀及空蚀。图 9 分别为400 MPa压力下∅0.40 mm 和∅0.25 mm 宝石孔报废后入口和出口的磨损情况。可以看出：入口的磨损较为严重，孔口轮廓已经不规则，且边缘破坏程度不均匀，这是由空泡溃灭时产生的压力波及高压水的冲蚀造成的；出口的磨损程度较低，边缘破坏程度较均匀且保持着较规则的轮廓；∅0.40 mm宝石出口的破损程度较轻，这是喷嘴内产生了液壁分离的缘故。

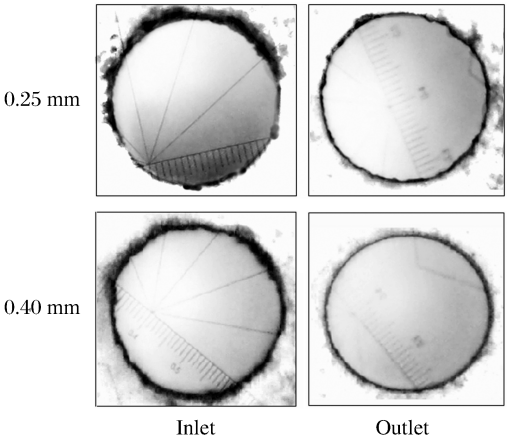


图 9 宝石损坏时入口及出口的显微图像

Fig. 9 Micrograph of the inlet and outlet of the damaged jewel

宝石入口边缘遭到破坏后，在射流形成时产生较大的原始扰动，严重影响射流的集束性，降低水切割的效率。

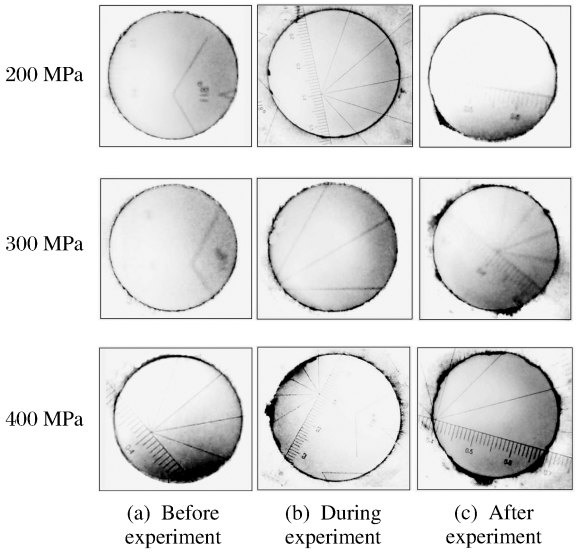


图 10 不同压力下宝石入口磨损的显微图像

Fig. 10 Micrograph of the wear for the orifice inlet under different pressures

为了研究压力对空化及宝石磨损的影响，将几枚全新的∅0.25 mm宝石喷嘴置于不同压力下持续运作，在实验前、实验中及实验结束后将宝石卸下进行观测。选择∅0.25 mm的宝石是因为在该长径比下孔内的空化更具持续性。磨损情况如图 10 所示，从图 10 中可以看出：200 MPa 压力下，实验后宝石的入口边缘仅在个别位置上有所扩大，其它部分仍保持得较为完好；300 MPa 压力下，入口边缘的磨损比较明显；400 MPa 压力下，边缘的磨损非常显著，实验结束后轮廓出现多处破损且形状不规则。这说明随着压力的升高，宝石入口的磨损加剧，边缘的破坏程度加大。这是因为：压力升高时，孔内流速加大，空化变得更为剧烈，在壁面溃灭的空泡数量增多，溃灭时对壁面的破坏力增强；同时，由于流速变大，高压水在入口处脱流时，水对边缘的剪切力增大，冲蚀效果增强。

在磨损实验中，对两种孔径的宝石喷嘴在不同

压力下形成的外部射流进行了观测,如图 11 所示。从图 11 中可以清楚地看出:当压力升高时,射流的集束性降低,直径保持不变的距离缩短,这是射流边缘与空气的摩擦加剧造成的。进一步观察图 11 中喷嘴出口附近的柱状射流,可以发现,随着压力的升高,∅0.40 mm喷嘴出口处的射流直径有所增大,而∅0.25 mm喷嘴却无明显变化。这说明∅0.40 mm宝石孔内液壁分离造成的射流与壁面间的间隙随着压力增大而不断缩小,而∅0.25 mm 宝石孔内因空化区域未发展至出口,致使下游射流的直径始终与孔径大小相近。实验结果与我们的数值计算结果一致,在一定程度上证明了在空化发展至出口的条件下,喷嘴内部空化区域沿径向的发展程度随着压力的升高而降低的结论。

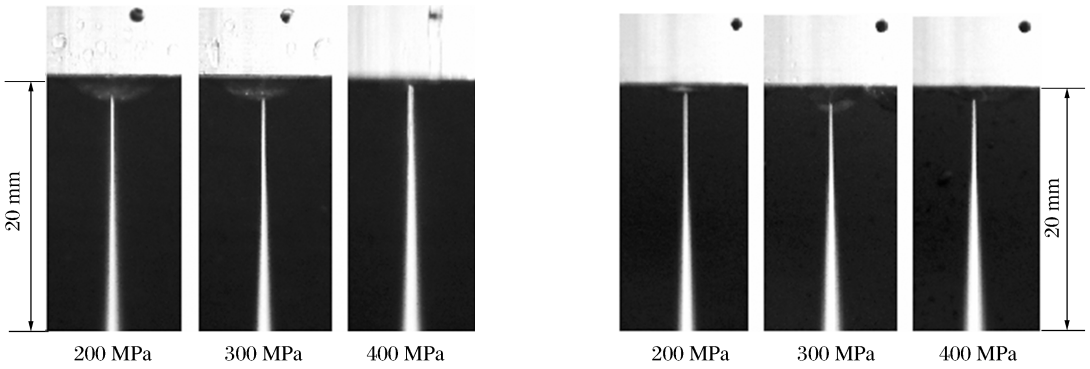


图 11　不同压力下喷嘴的外部射流

Fig. 11　Jet outside the nozzle under different pressures

4　结　论

为研究超高压力下宝石喷嘴的内部空化对射流及喷嘴磨损的影响,对宝石孔内的空化流动进行了数值模拟,结合宝石喷嘴磨损实验,可以得到以下结论。

(1) 高压水在进入宝石孔入口后发生空化,在常规的直角型入口喷嘴中,空化的发展根据宝石孔的长径比不同而呈现出不同的程度。在一定的长径比范围内,空化区域可以逐步发展到喷嘴出口,最终起到缩小射流初始直径的作用,且在此条件下,压力升高时,射流直径会有所增大。

(2) 入口形状对宝石内的空化影响较显著。倒角型和圆角型入口可以显著缩小空化影响区域,但目前这两种入口形线在工程中并不具备较高的经济效益。

(3) 空化及冲蚀是造成宝石损坏的重要原因。对于运行中的宝石喷嘴,其壁面形状遭到破坏,入口的破损程度比出口更为显著,并且随着压力的升高,磨损加剧。选用合适的长径比,可使宝石孔内出现液壁分离,起到削弱下游冲蚀磨损的积极作用。

References:

[1] Osman A H, Mabrouki T, Théry B, et al. Experimental Analysis of High-Speed Air-Water Jet Flow in an Abrasive Water Jet Mixing Tube [J]. Flow Meas Instrum, 2004, 15(1): 37-48.

[2] Junkar M, Jurisevic B, Fajdiga M, et al. Finite Element Analysis of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining [J]. Int J Impact Eng, 2006, 32(7): 1095-1112.

[3] Vikram G, Ramesh B N. Modelling and Analysis of Abrasive Water Jet Cut Surface Topography [J]. Int J Mach Tool Manuf, 2002, 42(12): 1345-1354.

[4] Palleda M. A Study of Taper Angles and Material Removal Rates of Drilled Holes in the Abrasive Water Jet Machining Process [J]. J Mater Process Technol, 2007, 189(1-3): 292-295.

[5] Hou R G, Huang C Z, Wang J, et al. Simulation of Velocity Field of Two-Phase Flow for Gas and Liquid in the Ab-

rasive Water Jet Nozzle [J]. Key Eng Mater, 2006, 315-316: 150-153.

[6] Hou R G, Huang C Z, Wang J, et al. Simulation of Solid-Liquid Two-Phase Flow Inside and Outside the Abrasive Water Jet Nozzle [J]. Key Eng Mater, 2007, 339: 453-457.

[7] Liu H, Wang J, Kelson N, et al. A Study of Abrasive Waterjet Characteristics by CFD Simulation [J]. J Mater Process Technol, 2004, 153-154: 488-493.

[8] Shanmugam D K, Wang J, Liu H. Minimisation of Kerf Tapers in Abrasive Waterjet Machining of Alumina Ceramics Using a Compensation Technique [J]. Int J Mach Tool Manuf, 2008, 48(14): 1527-1534.

[9] Cui L L, An L Q, Mao L T, et al. Application of in Frared Thermal Testing and Mathematical Models for Studying the Temperature Distributions of the High-Speed Waterjet [J]. J Mater Process Technol, 2009, 209(9): 4360-4365.

[10] Anantharamaiah N, Vahedi Tafreshi N, Pourdeyhimi B. A Study on Flow Through Hydroentangling Nozzles and Their Degradation [J]. Chem Eng Sci, 2006, 61(14): 4582-4594.

Cavitation and Wear in the Micro Jewel Nozzle of Ultra-High Pressure Water Jet

YANG Min-Guan, WANG Yu-Li, KANG Can, YU Feng

(*School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In an ultra-high pressure water jet cutting system, the micro jewel nozzle has important influences on the machining efficiency. Cavitation inside the jewel orifice affects the jet formation directly and is a crucial reason for the nozzle wear. By simulating the cavitation flow in the orifice at pressure within 400 MPa, the jet formation process in the nozzle was expounded. The influence of pressure, the aspect ratio and the inlet shape of orifice on the cavitation and jet were also analyzed. At the same time, an experiment was carried out to study the nozzle wear. The results show that the cavitation region in orifice reduces along the nozzle axis with the increasing of the aspect ratio. Moreover, the cavitation region can reach the nozzle outlet when the aspect ratio is smaller than a certain value. At this condition, the jet initial diameter is smaller than the orifice diameter and increases with the increase of pressure. The orifice inlet with a streamline design can effectively restrict the cavitation development. The wear in the jewel orifice inlet due to the cavitation and water erosion is much more severe than in the outlet and is more serious under higher operating pressure. Accordingly, it is useful to select a appropriate aspect ratio for reducing the erosion in the nozzle.

Key words: ultra high pressure water jet; jewel nozzle; cavitation; wear