

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.02.002

# 具有壅塞环的空化器特性数值分析

苏新, 张凤华, 邵军, 唐川林, 卓杜, 单礼伟

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 出现壅塞空化现象时, 壅塞管内流场会发生剧烈变化。利用计算流体力学软件Fluent, 采用标准模型 $k-\varepsilon$ 和多相流空化模型, 在不同入口速度和背压条件下对具有壅塞环的空化器进行数值模拟, 分析空化器壅塞环在不同位置时, 空化区域内静压力和空隙率的分布情况。试验结果表明: 壅塞环可以增加壅塞截面下游的恢复压力, 且壅塞环离环形喷嘴出口越远, 作用越明显; 壅塞环可以增大产生壅塞空化的最佳背压范围, 且壅塞环离环形喷嘴越近, 产生壅塞空化流动的最佳背压范围越大。

**关键词:** 壅塞空化器; 数值分析; 背压; 壅塞环

中图分类号: TP602

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)02-0005-07

## Numerical Analysis on Characteristics of Cavitator with Choking-Ring

Su Xin, Zhang Fenghua, Shao Jun, Tang Chuanlin, Zhuo Du, Shan Liwei

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Cavitating flow in choking pipe changes violently under choking cavitation. Using the computational fluid dynamics software of Fluent, the standard  $k-\varepsilon$  model and multiphase flow cavitation model, mode numerical simulation on the cavitator with choking ring under different inlet velocity and back pressure conditions, analyzed the distributions of static pressure and void ratio in cavitation area when the choking ring at different position. The results show that choking ring can prompt the back pressure of the down stream of choking cross, and the farther choking ring from the annular nozzle exit is, the more obvious the effect is. The choking ring can increase the range of optimum back-pressure generating choking cavitation, and the closer choke ring from the annular nozzle is, the pressure range of cavitating flow bigger is.

**Keywords:** choking cavitator; numerical simulation; back pressure; choking ring

## 0 引言

在流体系统中, 如果上游的压力恒定, 当流体的流道变小时, 流速会增加。与此同时, 流体的静压力会降低, 当其低于该流体的饱和蒸汽压时, 在

固液交界面处会形成水蒸汽, 溶解在液体中的气体也会溢出, 形成空泡。随着压力的降低, 空泡得到生长<sup>[1]</sup>。而随着空泡数量和体积的增加, 流体会由单一的液体流逐渐转化成为空泡流(汽液两相流)。根据气液两相流理论, 含有大量空泡的流体(气液两

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374101), 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ9013), 湖南省科技厅计划基金资助项目(2013SK3165), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(09C338)

作者简介: 苏新(1988-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为水力空化处理污水,

E-mail: 734167422@qq.com

通信作者: 张凤华(1960-), 男(彝族), 云南弥勒人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事水射流技术及应用方面的研究,

E-mail: fenghua387@126.com

相流)会使当地音速急剧下降,甚至在流道下游的某一断面处会出现当地马赫数  $Ma=1$  的情况,这就是气液两相流中的壅塞现象<sup>[2-3]</sup>。

对于壅塞现象的研究,最早可以追溯到1936年,R. G. von Pawell首先通过透明的喷射器观察到这一现象。其后,J. H. Witte<sup>[4]</sup>基于恒温理论模型,论证了在直管中的汽液两相流的某一位置处的马赫数等于1时,会出现壅塞空化现象,即该研究者所说的混合激波。A. Attou等人<sup>[5-6]</sup>通过研究阶梯圆管中的稳态绝热闪蒸流,发现壅塞现象的产生应同时满足2个条件,即下游压力小于或等于下游临界点的临界压力,下游的水头损失系数小于或等于最大水头损失系数。龙新平等人在<sup>[2-3]</sup>在研究射流泵极限工况下的空化流动时,观测到当射流泵极限工况发生时,该空化流成为混合均匀的泡状流,并在喉管出口或扩散管内溃灭,此时,射流泵的出口流量不会随出口压力的变化而变化。此外,日本的青山邑里等人<sup>[7-10]</sup>也研究过壅塞现象,并取得了一些成果。目前,国内外研究学者主要是通过实验手段来研究壅塞空化现象,但是,由于受到测试手段的限制,很难测出壅塞空化现象出现时壅塞管内的压力、速度和空隙率的分布,因此,利用CFD软件(computational fluid dynamics)对其进行数值模拟分析,不失为一种好的研究手段。

本课题组利用Fluent软件,对处于不同背压(下游压力)下,不同结构的壅塞空化器进行数值模拟分析,分析壅塞空化流动情况,探讨壅塞管内的压力、速度和空隙率等因素对壅塞空化现象的影响。

## 1 计算模型与网格

### 1.1 计算模型与网格划分

壅塞空化器<sup>[11-13]</sup>的结构简图如图1所示。壅塞空化器是由环形喷嘴、壅塞管和壅塞环等构件组成。水流由环形喷嘴流入,经壅塞管流出,壅塞环位于壅塞管内。图中, $L$ 为壅塞管长度, $D$ 为壅塞管直径, $M$ 为环形喷嘴出口到壅塞环的距离。

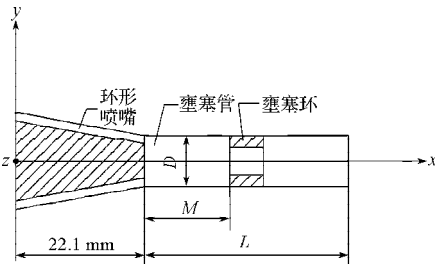


图1 壅塞空化器的结构简图

Fig. 1 The schematic diagram of choking cavitator

本文采用GAMBIT软件建立空化器的三维模型。

由于该结构是对称结构,为缩小计算量,采用其结构的一半来进行计算。网格划分所采用的方式为Hex/Wedge(六面体网格为主,辅以楔形网格),类型为Cooper(按照指定的源面进行网格划分),网格模型如图2所示。对壅塞空化器进行模拟分析时,壅塞环的位置分别取 $M=0.3L$ ,  $M=0.5L$ 和 $M=0.7L$ 。

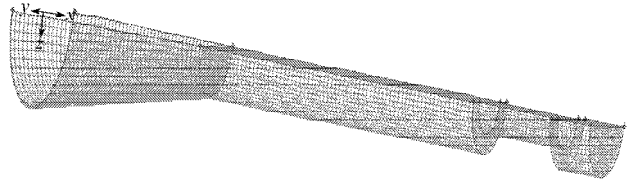


图2 空化器网格模型

Fig. 2 Mesh model of choking cavitator

### 1.2 边界条件及算法

采用速度入口作为入口边界条件,速度 $v$ 为28.7 m/s。入口的湍流强度为4.5%。出口采用的边界条件为压力出口,出口压力 $P_b$ 为0~150 kPa。对称轴选用轴对称边界条件。壁面采用标准的壁面函数处理。

计算时,气液两相流采用Mixture模型,不考虑滑移速度和体积压力项,传质模型使用Fluent自带的Cavitation模型,紊流模拟采用Realizable  $k-\xi$ 湍流模型;各项计算以残差低于 $10^{-3}$ ,且进出口流量相对偏差低于0.1%作为收敛标准;压力速度耦合方式为simple,压力插值为一阶格式,动量、 $k$ 和 $\xi$ 方程的求解采用一阶迎风格式。

本文计算和分析时所用压力均为相对压力。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 壅塞空化现象

当壅塞空化器的壅塞环位置 $M=0.7L$ ,入口速度 $v=28.7$  m/s,背压 $P_b=50$  kPa时,数值计算结果见图3~10。空隙率 $a=V_g/V$ ,式中, $V_g$ 为壅塞管内气相体积, $V$ 为壅塞管内混合相体积。图3和图4分别为壅塞空化器静压力和空隙率变化云图。

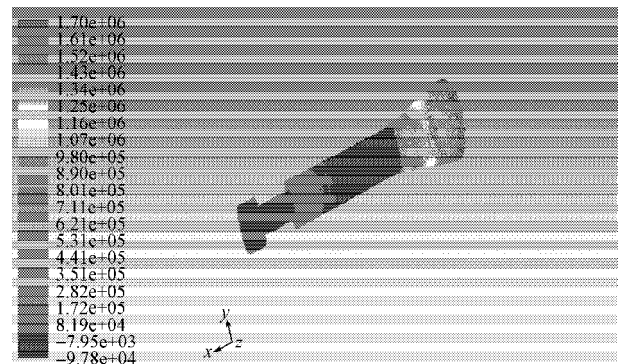


图3 壅塞空化器的静压力变化云图

Fig. 3 Static pressure cloud chart of choking cavitator

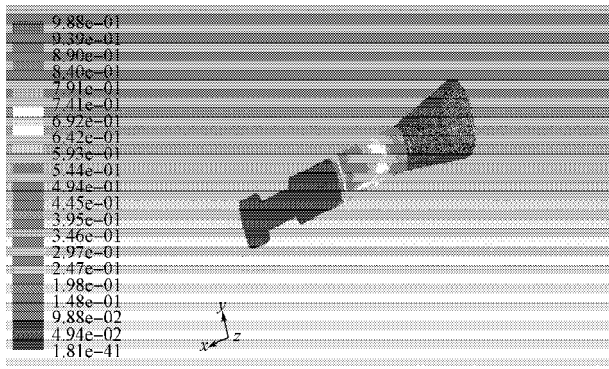


图4 壅塞空化器的空腔率变化云图

Fig. 4 Void ratio cloud chart of choking cavitator

由图3~4可以看出, 壅塞管内的压力分布被分割为2个部分: 压力较低的区域和压力较高的区域。将壅塞管分割为2个部分的截面即为壅塞截面。压力较低的区域即壅塞截面的上游部分, 有利于空泡的生长和发育, 因此, 在这个区域的空腔率也相对较高。而壅塞截面的下游部分, 由于背压的作用, 使得壅塞管下游压力迅速增大, 在强大的压力下, 空泡迅速溃灭, 因此, 此区域内的空腔率几乎为0。

图5和图6分别为壅塞管轴心线上静压力和空腔率分布图。

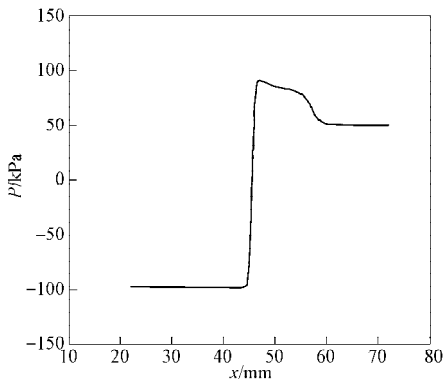


图5 壅塞管轴心线上的压力分布图

Fig. 5 Diagram of static pressure distribution of choking pipe axial line

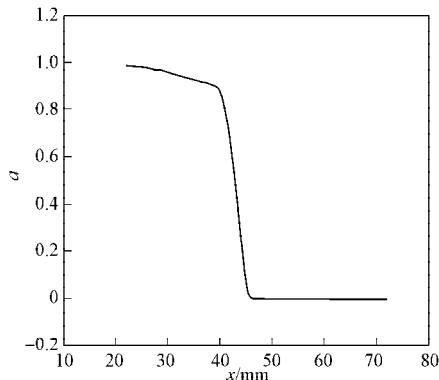


图6 壅塞管轴心线上的空腔率分布图

Fig. 6 Void ratio distribution diagram of choking pipe axial line

从图5~6可以看出, 在上述条件下, 壅塞截面在轴心线上的位置为 $x=45\text{ mm}$ 。壅塞管轴心线的上游低压区域的压力值约为 $-100\text{ kPa}$ , 高压区域的最大压力值约为 $90\text{ kPa}$ 。轴心线上的最大恢复静压力梯度达 $1.11 \times 10^8\text{ Pa/m}$ 。在如此大的压力梯度下, 空泡几乎得到完全溃灭。在轴心线 $x=45\text{ mm}$ 处, 空腔率迅速下降为0。

图7和图8分别为 $x-y$ 平面上壅塞截面的压力和空腔率变化的局部放大云图。

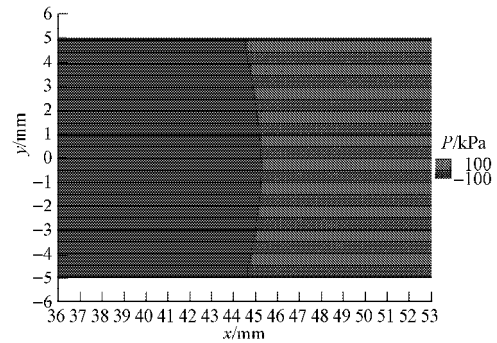


图7  $x-y$ 平面上壅塞截面静压力分布的局部放大云图

Fig. 7 Static pressure cloud chart of partial choking cross section on the  $x-y$  plane

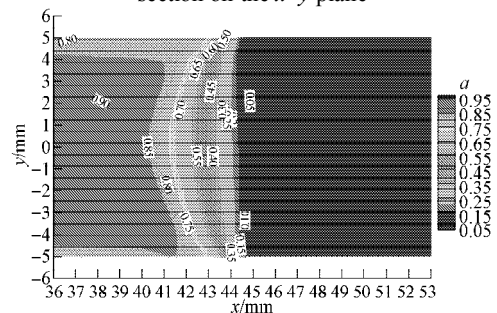
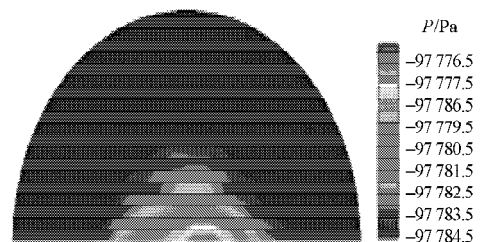


图8  $x-y$ 平面上壅塞截面空腔率分布的局部放大云图

Fig. 8 The partial cloud chart for void ratio distribution of choking cross section on the  $x-y$  plane

由图7~8可以看出, 壅塞截面附近的静压力和空腔率呈大梯度变化, 壅塞截面并非平面, 而是成一定弧度的曲面, 且轴心部分的壅塞截面位置相对周边部分, 更靠近于壅塞管出口位置, 流体的空腔率也是在壅塞截面附近非常小的区域内( $42 \sim 45\text{ mm}$ )迅速降低。

图9和图10分别是壅塞管不同横截面的静压力和空腔率云图。



a)  $x=25\text{ mm}$

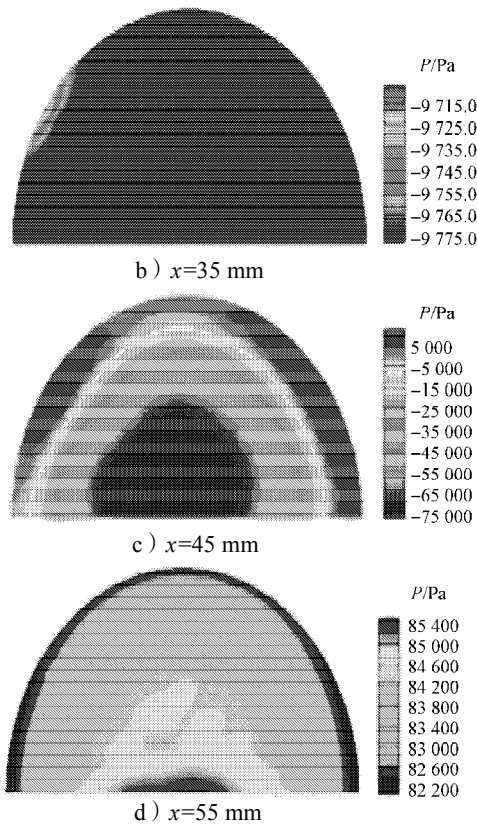


图9 壅塞管不同截面的静压力云图

Fig. 9 Static pressure cloud chart of the choking pipe in different cross section

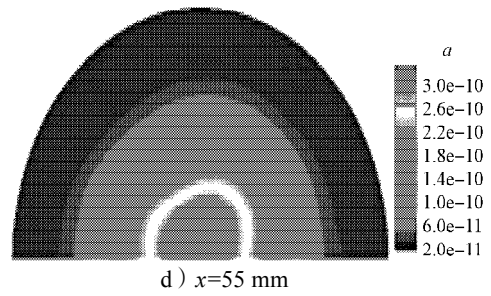
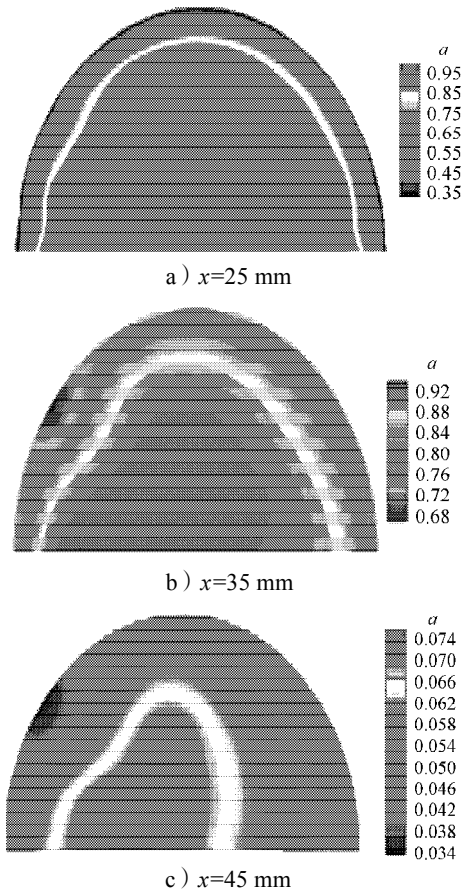


图10 壅塞管不同截面的空隙率云图

Fig. 10 Void ratio cloud chart of the choking pipe in different cross section

由图9~10可以看出,当 $x=25\text{ mm}$ 和 $x=35\text{ mm}$ 时,在壅塞截面的上游区域,其静压力值都非常低且变化不大,而截面整体的空隙率逐渐变大;在 $x=45\text{ mm}$ 处,轴心线上的压力依然较低,而截面周边的压力已经开始增大,这也说明了壅塞截面并非平面,而是成一定弧度的曲面,且在此处由于压力的升高,流体中的空隙率迅速降低;在 $x=55\text{ mm}$ 处,受到背压的影响,这个截面处的整体压力都很大,在如此高的恢复压力下,流体中的空隙率几乎为0。

图11为 $x=25\text{ mm}$ 的速度矢量图。由图可知,此处壅塞管内的流动为涡流,这也是导致壅塞截面的上游部分压力低的原因。

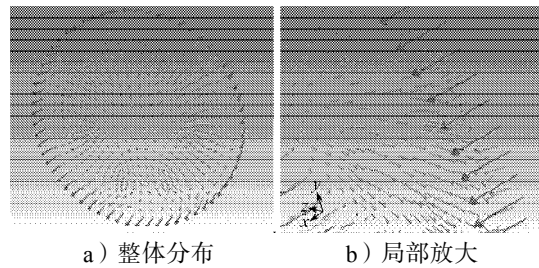


图11 壅塞管内 $x=25\text{ mm}$ 处的速度矢量图

Fig. 11 The velocity vector diagram at  $x=25\text{ mm}$  in choking pipe

当壅塞空化器中的水流进入环形喷嘴时,由于过流面积的减小,其流速增大。根据流体能量守恒原理,此时流体的静压力减小,当其减小到低于饱和蒸汽压力时,在环形喷嘴的壁面会有大量的气泡生成,并随着水流进入壅塞管,在壅塞管的上游部分形成涡流(见图11)。由于涡流的存在,使得壅塞管上游的压力依然很低,这为空泡提供了形成和生长的条件(见图9a和b)。因此,流体中的气相含量逐渐增大(见图10, $x=35\text{ mm}$ 截面处的整体空隙率高于 $x=25\text{ mm}$ 截面处)。此时,壅塞管内的流体由单相水流逐渐形成了混合均匀的汽液两相流,导致了两相流的当地音速迅速降低,气液两相流的当地马赫数迅速增大。当马赫数增大到1时,汽液两相流达到临界状态,形成壅塞空化流动,从而出现了壅塞截

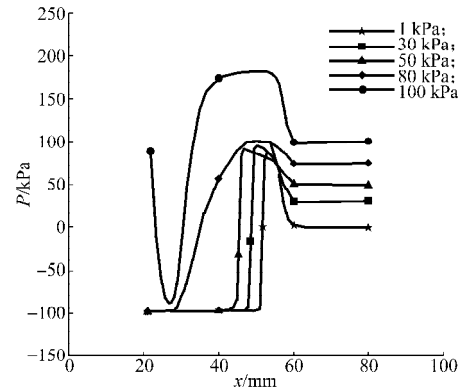
面即  $Ma=1$  处的断面。

综合图5~8可以看出, 壅塞截面位于  $x=45$  mm附近。根据图7~8, 计算得到壅塞截面的最大恢复压力梯度为  $6.25 \times 10^7 \sim 1.11 \times 10^8$  Pa/m (图7所示的压力差值比图8所示空隙率为0.80等值线到空隙率为0.05等值线的距离)。在如此大的恢复压力梯度下, 空泡经过壅塞截面时, 几乎完全溃灭, 流体中的空隙率迅速降低 (见图6, 8, 9c和9d)。

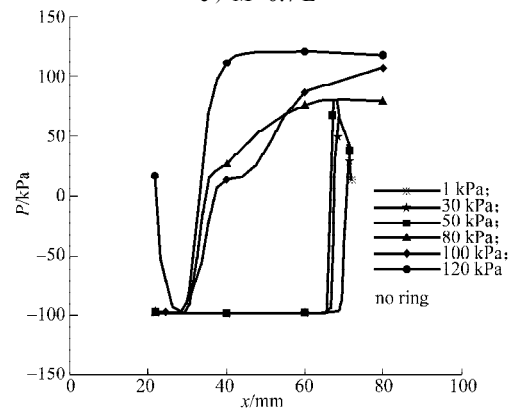
因此, 通过适当地控制壅塞空化器的各个运行参数, 能够在壅塞空化器内形成壅塞空化流动。在壅塞截面的上游部分, 能够形成有利于空泡产生和生长的低压区; 在壅塞截面下游, 会形成空泡溃灭所需的高背压, 满足了空化各阶段的压力需求, 从而提高了空化的强度。

### 2.2 壅塞环对壅塞空化的影响

当形成壅塞空化流动时, 壅塞管轴心线上的压力和空隙率的变化规律, 与整个截面的变化规律相似。为了分析简便, 在分析壅塞环对空化器特性的影响时, 只分析轴心线上的变化。图12和13分别为壅塞环在不同位置 ( $0.3L, 0.5L, 0.7L$  和无壅塞环) 和不同背压下, 壅塞管轴心线沿静程压力和空隙率的分布图。



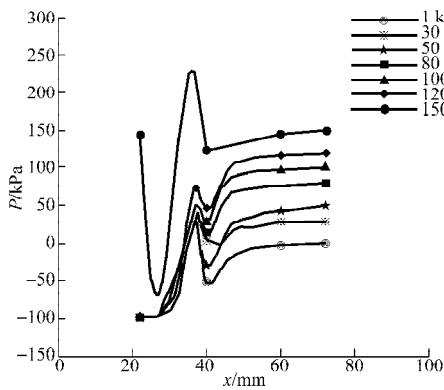
c)  $M=0.7L$



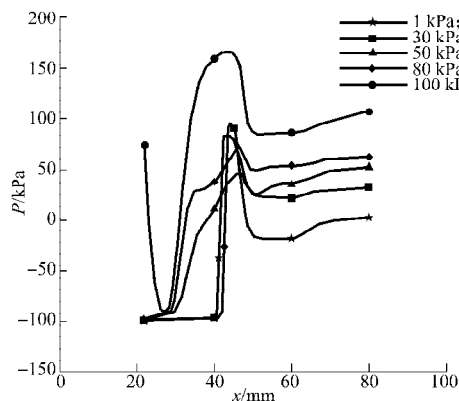
d) 无壅塞环

图12 壅塞管轴心线的沿静程压力分布图

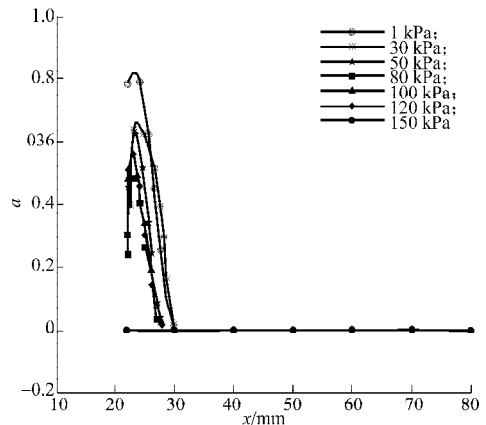
Fig. 12 Static pressure distribution along axis



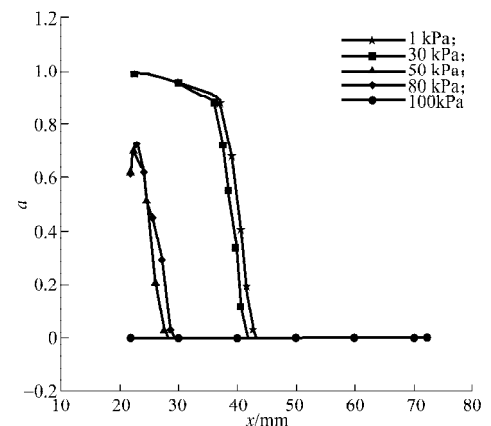
a)  $M=0.3L$



b)  $M=0.5L$



a)  $M=0.3L$



b)  $M=0.5L$

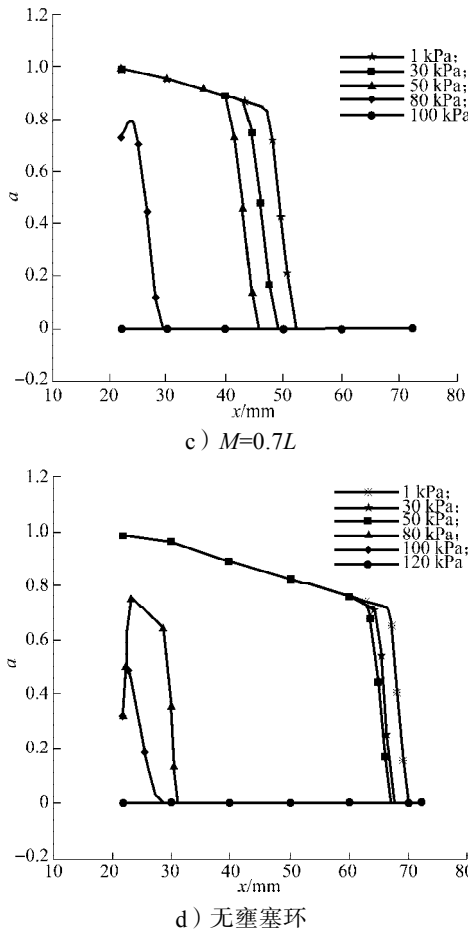


图13 壅塞管轴心线的空隙率分布图

Fig. 13 Void ratio distribution along axis

由图12可以看出, 壅塞环在4种不同的位置时, 随压力的变化, 壅塞截面移动规律一致, 即随着背压的增大, 壅塞截面向壅塞管上游移动。由气液两相流的临界流理论可知, 当形成壅塞空化流动时, 在临界压力下, 壅塞截面下游的压力变化不会影响上游的压力变化。背压越大, 壅塞截面的恢复压力梯度就越大, 越有利于空泡的溃灭。随着背压的增大, 壅塞截面向壅塞管上游移动, 进而压缩壅塞截面上游低压区域的空间, 导致空泡没有足够的时间生长, 从而影响空化强度。当背压过大时, 即背压大于两相流的临界压力时, 壅塞管内无法形成壅塞空化流动。由图12中a图的 $P_b=150$  kPa, b图的 $P_b=100$  kPa, c图的 $P_b=100$  kPa, d图的 $P_b=120$  kPa这4条曲线可知, 由于低压分布区过短, 空泡没有足够的生长空间, 使得壅塞管内气体含量很低。因此, 在此条件下对应的空隙率几乎没有变化(见图13中对应的空隙率变化曲线图)。因此, 存在一个最佳背压范围, 使得空化强度最大。

在管内加入壅塞时, 能够有效地增加壅塞截面的恢复压差, 且壅塞环离喷嘴距离越远, 恢复压差

值越大。在相同背压条件下, 如 $P_b=30$  kPa时, 管内无壅塞环(见图12d)时, 壅塞截面下游恢复压差值约为170 kPa; 当 $M$ 为0.3L时, 壅塞截面下游恢复压差值约为150 kPa; 而当 $M$ 为0.5L, 0.7L时, 壅塞截面下游的恢复压差值约为200 kPa, 比不加壅塞环时的恢复压力值要大, 因而更有利于空泡的溃灭。

当壅塞环离环形喷嘴越近时, 两相流的临界压力值越大, 即能够形成壅塞空化流动时所对应的背压范围越大。从仿真所选的几个背压值可以看出: 当 $M$ 为0.3L时, 形成壅塞空化流动的背压值范围为0~120 kPa; 当 $M$ 为0.5L, 0.7L时, 形成壅塞空化流动的背压值范围为0~80 kPa; 管内无壅塞环时, 形成壅塞空化流动的背压值范围为0~100 kPa。

### 3 结论

本文基于Urans方法, 利用Fluent软件, 在一定工况下, 对壅塞空化器的空化流动进行模拟, 分析不同背压条件下, 壅塞环位置对壅塞空化效果的影响。试验结果表明:

- 1) 在适当的运行条件下, 壅塞空化器会形成壅塞空化流动。同时可满足发生空化效应时对空泡的形成、生长以及溃灭所需要的不同流场压力的要求。
- 2) 在背压小于或等于两相流临界压力时, 壅塞环处于壅塞管的不同位置都会形成壅塞空化流动, 且临界压力值随着壅塞环距环形喷嘴出口越近而越大, 即能够形成壅塞空化流动的背压范围越大。
- 3) 壅塞环能够增加壅塞截面下游的恢复压差, 且壅塞环离环形喷嘴出口越远, 壅塞截面下游的恢复压差越大。
- 4) 壅塞环可以增大产生壅塞空化的最佳背压范围, 且壅塞环离环形喷嘴距离越近, 产生壅塞空化流动的背压范围越大。

### 参考文献:

- [1] Jyoti K K, Pandit A B. Water Disinfection by Acoustic and Hydrodynamic Cavitation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001, 7(3): 201-212.
- [2] Long X P, Yao H, Zhao J. Investigation on Mechanism of Critical Cavitating Flow in Liquid Jet Pumps Under Operating Limits[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(9/10): 2415-2420.
- [3] 龙新平, 姚昊, 赵建福. 射流泵极限工况下空化流动[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 59-64.  
Long Xinping, Yao Hao, Zhao Jianfu. Cavitating Flow in

- Jet Pump Under the Operating Limits[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 59-64.
- [4] Witte J H. Mixing Shocks in Two-Phase Flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 36(4): 639-655.
- [5] Attou A, Seynhaeve J M. Steady-State Critical Two-Phase Flashing Flow with Possible Multiple Choking Phenomenon Part 1: Physical Modelling and Numerical Procedure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12(5): 335-345.
- [6] Attou A, Bolle L, Seynhaeve J M. Experimental Study of the Critical Flashing Flow Through a Relief Line: Evidence of the Double-Choked Flow Phenomenon[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(6): 921-947.
- [7] Aoyama Y, Watanabe N, Yamamoto M, et al. Behavior of Cavitation Bubbles in Cylindrical Choke by Using Flow Visualization: 3rd Report, Case of Pressure Change in Downstream of Choke[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: B, 1999, 65(640): 4001-4008.
- [8] Aoyama Y, Matsuoka Y, Hiroaki N, et al. Flow Visualization of Cavitation in a Cylindrical Choke[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1996, 62(601): 3243-3249.
- [9] Yamamoto M, Matsuoka Y, Aoyama Y, et al. An Experimental Investigation of the Flow in a Curved Diffuser: 2nd Report, Effects of the Existence of a Guide Vane and the Variation in Logarithmic Spiral Angle on the Diffuser Performance[J]. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1996, 62(598): 2296-2302.
- [10] Aoyama Y, Watanabe N, Yamamoto M, et al. Cavitation Performance of Cylindrical Choke for Unsteady Flow: 2nd Report, Comparison of Difference in Inlet Shape of Choke [J]. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1999, 65(640): 3993-4000.
- [11] 张凤华, 刘海峰, 徐俊超, 等. 壅塞空化降解水中苯酚的实验研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(2): 55-59.  
Zhang Fenghua, Liu Haifeng, Xu Junchao, et al. Experimental Investigation on the Degradation of Phenol in Water with Choking Cavitation[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(2): 55-59.
- [12] 张凤华, 刘海峰, 徐俊超, 等. 壅塞空化与射流空化噪声谱特性的实验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(6): 47-50.  
Zhang Fenghua, Liu Haifeng, Xu Junchao, et al. Experimental Investigation on the Noise Spectrum Features of Choking-Cavitation and Jet-Cavitation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(6): 47-50.
- [13] 张凤华, 徐俊超, 刘海峰, 等. 壅塞空化器设计及其处理污水的可行性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(4): 30-36.  
Zhang Fenghua, Xu Junchao, Liu Haifeng, et al. The Choking Cavitator Design and Its Feasibility Study of Wastewater Treatment[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(4): 30-36.

(责任编辑: 邓彬)

