

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.006

壅塞管直径对壅塞空化器空化特性的影响

张凤华, 徐俊超, 唐川林, 苏新, 李念

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在不同壅塞管直径下, 利用 Fluent 软件对壅塞空化器进行数值分析并采用水听器对其空化噪声信号测试, 探索壅塞管直径对壅塞空化器空化特性的影响。测试结果表明: 增大壅塞管直径, 最大压力上升梯度值会增大, 壅塞截面会向上游移动; 壅塞空化器的数值分析和空化噪声信号测试结果基本吻合, 壅塞管的最佳直径为 10 mm。

关键词: 空化; 壅塞; 壅塞空化器; 数值分析; 空化噪声

中图分类号: TP602

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)05-0024-04

Effect of Choke Pipe Diameter on the Cavitation Characteristics of Choking Cavitor

Zhang Fenghua, Xu Junchao, Tang Chuanlin, Su Xin, Li Nian

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

Abstract: Under the condition of different choke pipe diameters, the choking-cavitor was made numerical analysis by Fluent software and the cavitation noise signals were tested. The effect of the diameters on the cavitation characteristics of choking cavitor was investigated. It is shown that as the choke pipe diameters increases, the maximum pressure gradient will increase and the choked section will move to the choke pipe upstream. The numerical analysis on the choking-cavitor is consistent with the cavitation noise signals test results, and the best diameter is 10 mm.

Keywords: cavitation; choking; choking cavitor; numerical analysis; cavitation noise

0 引言

水力空化是一项很有潜力的新型水处理技术, 其具有能量利用率高、处理量大、设备简单、易于实现工业化等优点^[1-2]。目前, 国内外对于水力空化的研究主要表现为 3 种形式: 射流空化^[3]、孔板空化^[4]和漩涡空化^[5]。这 3 种空化的方法都未能很好地使空泡有效溃灭(即不能快速溃灭并释放高能量), 严重制约了水力空化在工业中的应用。作者所提出的壅塞空化器能较好地解决空泡的有效溃灭问题,

能更有效地产生空化效应, 是一种新型高效的水力空化装置^[6-8]。

水力空化技术应用于水处理中, 主要是利用空泡溃灭时产生的高温高压等特殊的物理化学环境, 因此, 其关注的重点是空泡溃灭的有效性。本文通过在不同壅塞管直径下对壅塞空化器的空化过程进行数值分析与噪声信号测试, 探索壅塞管直径对壅塞空化器空泡溃灭特性的影响, 为壅塞空化器的优化设计提供依据。

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ9013), 国家自然科学基金资助项目(51374101)

作者简介: 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

1 数值分析

1.1 网格划分

壅塞空化器的结构简图如图1所示。图中, 壅塞管长度 L 为 50 mm, D 为壅塞管直径。

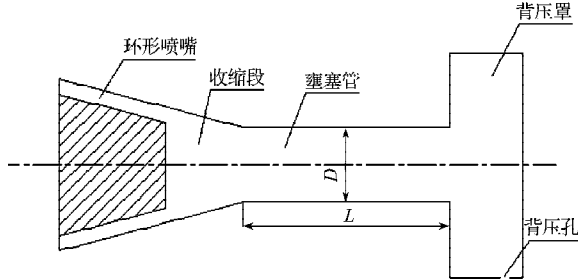


图1 壅塞空化器的结构简图

Fig. 1 Configuration of choking-cavitator

水流从环状喷嘴射入壅塞管内, 在壅塞管的上游开始出现大量的空泡, 随着携带大量空泡的流体(气液两相流)在壅塞管内流动, 管内气相含量快速增加, 当地音速急剧下降。在壅塞管后部的某断面当地马赫数 $Ma=1$ (称为壅塞截面) 时, 出现了所谓的气液两相流“壅塞”现象。根据气液两相临界流理论, 壅塞截面下游的流场压力增加(低于临界压力时)不会影响上游流场的压力。适当控制背压的大小, 一旦在壅塞空化器内建立起了稳定的壅塞流动, 当地马赫数为1的壅塞截面就把管内流场分为了2个区域, 上游为空泡的产生区(低压区), 下游为空泡的溃灭区(高压区)。在壅塞截面处可建立较高的压力上升梯度, 这样有利于空泡的有效溃灭。因此, 壅塞空化器可以同时满足空化过程中的空泡产生和溃灭需要不同流场的要求, 使空化过程中所产生的空泡几乎全部得到有效溃灭。

为了方便将其简化为轴对称问题, 减少仿真的计算量和计算时间, 故选取环形喷嘴入口至壅塞管段作为计算区域, 只需取 1/2 的物理模型采用结构化网格对计算区域进行网格划分, 见图2。

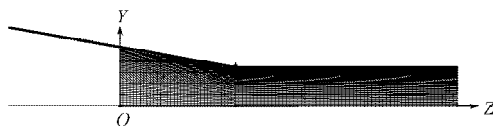


图2 壅塞空化器模型的网格划分

Fig. 2 Model meshing of choking-cavitator

1.2 算法及边界条件

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, 而传质模型使用 Fluent 自带的 Cavitation 模型, 紊流模拟采用 Realizable $k-\zeta$ 湍流模型, 各项计算以残差低于 10^{-5} , 且进出口流量相

对偏差低于 0.5% 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 ζ 方程的求解采用一阶迎风格式。

边界条件: 空化器进水处采用压力入口边界, 进口压力设置为 1.02 MPa, 该值固定不变; 壅塞管出口处设定为压力出口边界, 出口压力为 0.1 MPa; 对称轴选用轴对称边界; 壁面采用标准的壁面函数处理。

本文计算和分析时, 压力均采用绝对压力。

1.3 壅塞管直径对空化的影响

图3~4 分别是7种不同壅塞管直径(6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 mm)的壅塞空化器在背压为绝对压力 0.1 MPa 下, 轴心线的压力和气体体积分数对比图。轴心线 Z 的坐标同图2。

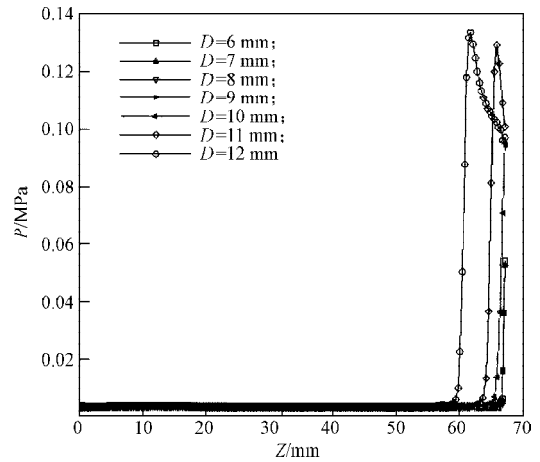


图3 不同壅塞空化器轴心线的压力分布图

Fig. 3 Pressure distribution on the axis of different choking-cavitators

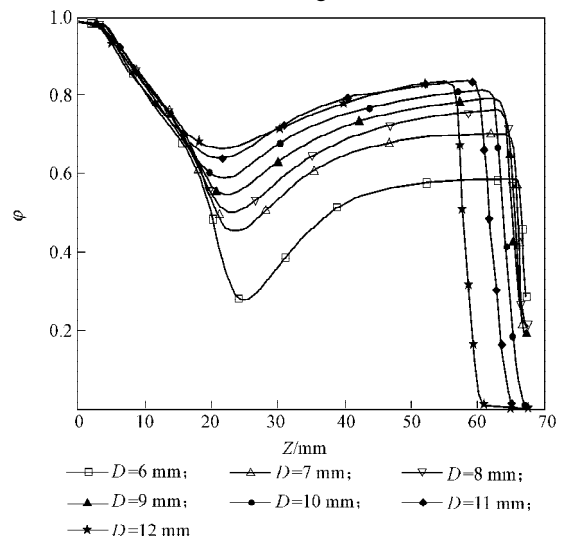


图4 不同壅塞空化器轴心线的气体体积分数分布图

Fig. 4 Air volume fraction distribution on the axis of different choking-cavitators

由图3和4可知:

1) 在 0.1 MPa 的背压下, 壅塞空化器轴心线上的

压力或气体体积分数的分布随堵塞管直径的变化规律一致。

2) 在图3中, 随着堵塞管直径的增大, 堵塞截面向堵塞管上游移动, 最大压力值增大, 最大压力梯度值也增大, 气泡能更有效地溃灭。

3) 在图4中, 随着堵塞管直径从6 mm增大到12 mm, 其溃灭前最大气体体积分数从57.9%增大到83.5%; 当堵塞管直径增大到10 mm时, 只有少量气泡没有溃灭。

因此, 增大堵塞管直径有利于产生空化。但是随着堵塞管直径的增大, 堵塞截面会向上游移动, 导致上游产生的气泡来不及长大, 影响气泡溃灭的效果。因此, 堵塞管的直径不易过大, 堵塞管的最佳直径为10 mm。

2 噪声信号测试与分析

2.1 试验装置

堵塞空化器噪声信号测试的试验系统由水箱、涡旋泵、堵塞空化器和水听器等组成, 堵塞空化器淹没在水槽中, 如图5所示。

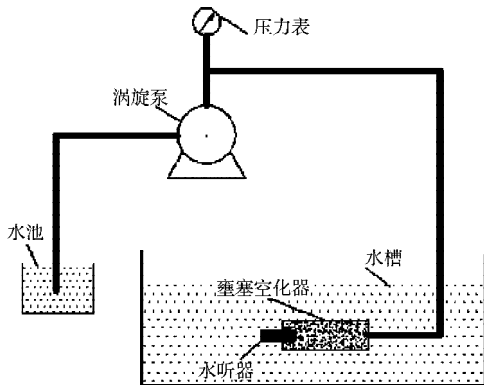


图5 试验系统简图

Fig. 5 Diagram of experiment setup
水听器安装在背压罩内如图6所示。

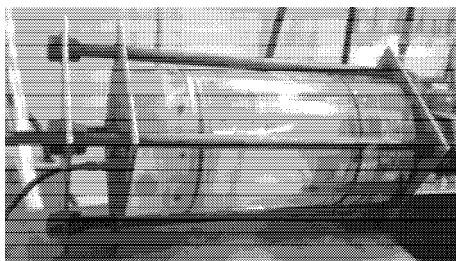


图6 水听器的安装位置

Fig. 6 Installation position of hydrophone

通过改变背压罩径向小孔的组合方式来调整背压孔的当量直径 d , 从而调节背压罩内的背压大小。水泵型号为1W2.5-12型涡旋泵, 流量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程120 m, 额定功率3 kW; 水槽尺寸为 $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times$

0.4 m; 水听器型号CS-3 (中国科学院声学研究所), 可在几 Hz 至 160 kHz 的频率范围工作, 灵敏度 $M=-210 \text{ dB}$ 。测试系统为湖南工业大学和清华大学联合开发的 CavTest 空化噪声测试系统。

2.2 能量比值分析

声压级 (sound pressure level, SPL) 定义为

$$L_p = 20 \lg \frac{P_i}{P_{\text{ref}}}, \quad (1)$$

式中: P_i 为瞬时声压; P_{ref} 为参考声压, 在空气中一般取 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

噪声能量 E 定义为

$$E = 0.2316 \times 10^{-12} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}} \times f_i, \quad (2)$$

式中: E 为噪声能量, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; L_{pi} 为频带的声压级, dB; f_i 为频带的中心频率, Hz; n 为测量频带内等频段个数, 取10。

在堵塞管直径为12 mm, 背压孔当量直径为12 mm的条件下, 采集的信号做为背景噪声信号, 并认为该信号没有明显的空化信号, 主要是紊流信号和其他干扰信号。将背景噪声信号与其他背压下的空化噪声信号进行比较分析, 能有效地排除除空化噪声信号以外的其他信号的影响。

$$\text{取能量比值对数 } \lambda = \log_2 (E/E_b) \quad (3)$$

来分析测试结果, 式中 E_b 为背景噪声能量。当对数值等于1时, 认为发生明显空化。

将式(1)和式(2)代入式(3), 得到能量比值对数计算式

$$\lambda = \log_2 \frac{E}{E_b} = \log_2 \frac{\sum_{i=1}^n p_i^{20} \times f_i}{\sum_{i=1}^n p'_i{}^{20} \times f_i}, \quad (4)$$

式中, p_i 与 p'_i 分别为对应频率下采集的空化噪声与背景噪声的瞬时声压。

图7是不同背压孔当量直径时, 空化噪声能量比值对数随堵塞管直径的变化曲线。

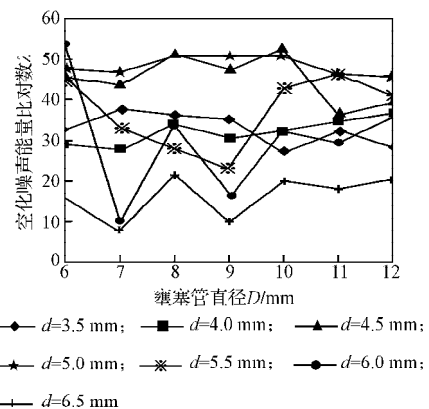


图7 堵塞管直径对空化噪声能量比的影响

Fig. 7 Effect of choke pipe diameter on cavitation noise energy ratio

由图7可知:

1) 当背压孔当量直径 d 为4.5, 5.0 mm时, 空化噪声能量比值对数较大。当壅塞管直径小于10 mm时, 壅塞空化器的空化噪声能量比值对数基本保持不变, 而壅塞管直径大于10 mm时, 其空化噪声能量比值对数减小。

2) 当背压孔当量直径 d 为3.5, 4.0 mm时, 空化噪声能量比值对数值对壅塞管直径的变化不敏感, 且其值较小。

3) 当背压孔当量直径 d 为5.5, 6.0, 6.5 mm时, 空化噪声能量比值对数值随壅塞管直径的变化波动较大, 说明此时在壅塞管内未能建立起稳定的壅塞空化现象。

综合考虑, 壅塞管直径为10 mm时, 壅塞空化效果最佳。

3 结论

通过对壅塞空化器在不同壅塞管直径下的数值分析与空化噪声信号测试分析, 可得如下结论:

1) 增大壅塞管直径, 最大压力上升梯度值会增大, 壅塞截面会向上游移动。

2) 壅塞空化器的数值分析和空化噪声信号测试结果基本吻合, 壅塞管的最佳直径为10 mm。

参考文献:

- [1] Gogate P R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(6): 996-1011.
- [2] Amin L P, Gogate P R, Burgess A E. Optimization of a

Hydrodynamic Cavitation Reactor Using Salicylic Acid Dosimetry[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 165-169.

- [3] Chahine G L, Kalumuck K M. Fluid Jet Cavitation Method and System for Efficient Decontamination of Liquids: US, 6200486 B1[P]. 2001-03-13.
- [4] Gogate P R, Pandit A B. Hydrodynamic Cavitation Reactors: A State of the Art Review[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2001, 17(1): 1-85.
- [5] Chahine G L, Kalumuck K M. Swirling Fluid Jet Cavitation Method and System for Efficient Decontamination of Liquids: US, 6221260 B1[P]. 2001-04-24.
- [6] 张风华, 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.
- [7] 张风华, 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.
- [8] 张风华, 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): 55-57.
Zhang Fenghua, Liu Haifeng, Xu Junchao, et al. Experimental Investigation on Degradation of Phenol in Water with Choking Cavitation[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(2): 55-57.

(责任编辑: 邓 彬)