

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.04.003

# 不同孔分布孔板的水力空化 效果的数值模拟

朱孟府<sup>1</sup>, 苗秀娟<sup>2,3</sup>, 邓 橙<sup>1</sup>, 谢 炜<sup>2</sup>, 宿红波<sup>1</sup>, 游秀东<sup>1</sup>, 陈 平<sup>1</sup>

(1. 军事医学科学院 卫生装备研究所, 天津 300161;  
2. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114;  
3. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:**基于大型流场计算软件 FLUENT, 选用标准  $\kappa-\varepsilon$  双方程湍流模型, 针对多孔孔板水力空化器中圆形阵列、圆形均布和水平均布 3 种孔分布方式, 对孔板汽含率、湍动能及流线速度矢量分布图等水力空化效果进行了数值模拟计算。结果表明, 水平均布多孔孔板的空化效果优于圆形阵列和圆形均布多孔孔板, 圆形均布孔板空化效果好于圆形阵列孔板; 孔的分布方式对流速影响不大, 但对孔板后临近壁面处漩涡产生的位置及数量有影响; 空化大部分发生在孔板小孔内流域中, 且高汽含率区域发生在孔板末端。图 5 表 1 参 8

**关 键 词:**水力空化; 多孔孔板; 数值模拟; 水处理

中图分类号: O351.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2012)04-0008-04

## Numerical Simulation of Hydrodynamic Cavitation Effect of Orifice Plate with Different Layout

ZHU Meng-fu<sup>1</sup>, MIAO Xiu-juan<sup>2,3</sup>, DENG Cheng<sup>1</sup>,  
XIE Wei<sup>2</sup>, SU Hong-bo<sup>1</sup>, YOU Xiu-dong<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China;  
2. College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
3. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Based on FLUENT large-scale flow field calculation software and standard  $\kappa-\varepsilon$  turbulence model, the numerical simulation of hydrodynamic cavitation effect of three kinds of orifice plates — circular array, circular uniform distribution and horizontal uniform distribution — was studied, and the vapor fraction, turbulent kinetic energy and the flow velocity vector distribution figure were obtained. The results showed that the cavitation effect of average uniform orifice plate was better than circular array and circular uniform, and the cavitation effect of circular uniform orifice plate was better than circular array. Orifice layout had little effect on the flow, but had impact on the location and number of vortex generated at near the wall of the orifice plate. Most of the cavitation effect occurred within the orifice in the plate, and the high gas fraction region was took place at the end of orifice plate. [ Ch, 5 fig. 1 tab. 8 ref. ]

**Key words:** hydrodynamic cavitation; orifice plate; numerical simulation; water treatment

### 0 引言

空化是液体所特有的一种非常复杂的流体动力现象, 随着人们对空化认识的深入, 空化效应开始应用于

包括掺气水射流、空化清洗技术、水处理等领域。其中, 水力空化技术具有能量利用率高、装置简单、操作方便等优点<sup>[1-3]</sup>, 目前研究主要集中在水力空化反应器

收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-02-15

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(10ZCGYSH02000)

作者简介: 朱孟府(1965), 男, 山东沂南人, 博士, 研究员, 主要研究方向为水处理技术与设备。E-mail: zmf323@163.com

的结构设计上,通过空化流场的模拟计算,研究水力空化效果的影响参数。空化反应器形式主要有文丘里管和多孔孔板。对于多孔孔板空化反应器,可以通过改变其孔数、孔间距、孔板厚度等参数控制孔板的空化特性<sup>[4-5]</sup>,对其结构形式已有相关研究<sup>[6-7]</sup>,但对于多孔孔板中孔的分布方式对空化效果的影响,虽有涉及但并不具体,也未见详细对比。因此,基于标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  双方程湍流模型,以多孔孔板为空化器,对不同孔分布孔板的空化特性和空化效果进行了数值模拟,以便能根据特定目的设计孔板空化器,以控制空化的强弱,为更好地开展水力空化反应器空化效果实验和实际应用提供参考。

## 1 条件设置

### 1.1 计算模型

采用三维定常不可压缩雷诺时均  $N$ - $S$  方程<sup>[8]</sup>,以标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  双方程湍流模型来描述空化过程中的湍流特性。

湍流动能  $\kappa$  方程

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} \kappa - (\mu + \mu_t / \sigma_\kappa) \text{grad} \kappa) = G - \rho \varepsilon$$

湍流动能耗散率  $\varepsilon$  方程

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} \varepsilon - (\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \text{grad} \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)$$

$G$  为湍流动能生成项

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

湍流黏性系数

$$\mu_t = C_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon$$

其中,  $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_\kappa$  和  $\sigma_\varepsilon$  为经验常数,分别设为:  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 1.2 计算区域

利用流体计算软件 FLUENT 对流场进行计算,整个计算区域分成几部分,以空间六面体进行划分,各分布方式孔板表面离散网格如图 1 所示。为了准确模拟空化器周围涡流信息,对空化器以及孔进行了加密处理。孔板的主要结构参数为:孔数量为 19 个,孔径为 2 mm,孔板厚度为 10 mm,孔板直径为 32 mm,离散后整个流场空间单元约  $2.04 \times 10^6$  个。

由于计算流域的大小对计算结果的精确度有直接影响,因此,选取的计算区域应保证流场的充分发展。为了避免来流或尾流对空化效果产生影响,计算区域入口处和出口处均远离空化器。图 2 为具体计算区域示意图,如图所示,孔板前端距离入口 70 mm,后端距离出口 150 mm。

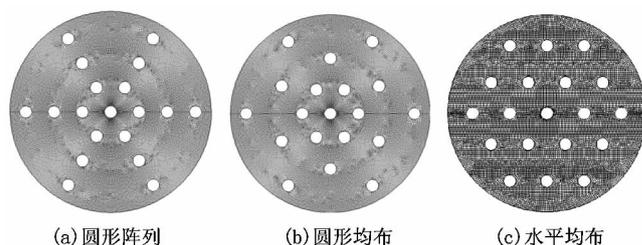


图 1 孔板截面离散网格图

Figure 1 Discrete grid diagram of orifice plate cross-section

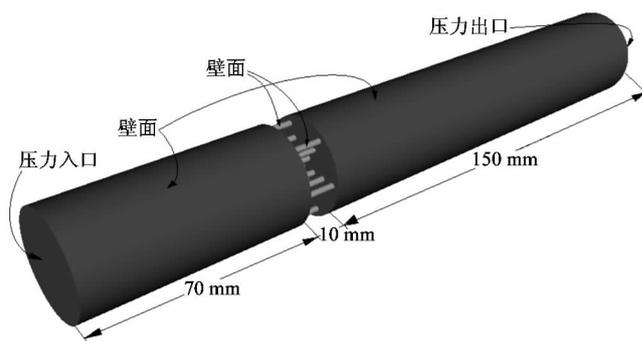


图 2 计算区域示意图

Figure 2 Schematic diagram of computational domain

### 1.3 边界条件

水力空化产生必须满足两个条件:一是局部压力低于水的饱和蒸气压;二是水中含有一定数量的非溶解气体的气核。模拟计算时,以 25 °C 水的物理参数为计算依据,其饱和蒸气压为 2 367.8 Pa,表面张力为 0.071 7 N/m,密度为 998.2 kg/m<sup>3</sup>,入口设为压力入口,压力值设为 0.5 MPa,出口设为压力出口,且静压为零。

## 2 结果与讨论

### 2.1 空化效率

孔分布方式对空化效率的影响见表 1。其中,空化数  $C_v$  可以衡量空化强度,表示式为:  $C_v = (p_0 - p_r) / 0.5 \rho v_0^2$ ,式中,  $p_0$  为孔板下游的恢复压强/MPa;  $p_r$  为相应温度下水流的汽化压强/MPa;  $v_0$  为孔内水的平均流速/(m · s<sup>-1</sup>);  $\rho$  为水的密度/(kg · m<sup>-3</sup>)。

表 1 不同孔分布孔板的空化效率

Table 1 Cavitation efficiency of orifice plate with different layout

分布方式	空化数	孔内平均汽含率/%	最大湍动能/(m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup> )	喉部最高速度/(m · s <sup>-1</sup> )
圆形阵列	0.29	14.25	34.63	34.42
圆形均布	0.29	14.68	34.69	34.42
水平均布	0.27	16.77	38.67	34.46

从表1可以看出,当孔板直径一定、孔数量和孔径均相同时,不同孔分布孔板的空化效率参数有所不同:与圆形阵列孔板相比,圆形均布孔板的空化数和喉部速度大小相等,而平均汽含率以及最大湍动能较大,说明圆形均布孔板的空化效果比圆形阵列孔板的空化效果好。而水平均布孔板的汽含率、湍动能以及喉部最高速度均大于两种圆形孔分布孔板,空化数小,说明水平均布孔板的空化效果好。

### 2.2 流线速度矢量

图3为不同孔分布孔板对称面上的流线速度矢量图,从图中可以看出,3种孔分布方式的孔板都是在孔板及其后部管段中速度较高,孔板的孔处速度最大,受惯性作用,孔内高速水流在流出孔后仍然保持较高的速度,如同射流,之后在管壁附近受摩擦阻力影响流速急剧下降,而中心处流速仍然较高,经孔板高速射流后,在临近壁面处均有漩涡产生。另外,不同孔分布孔

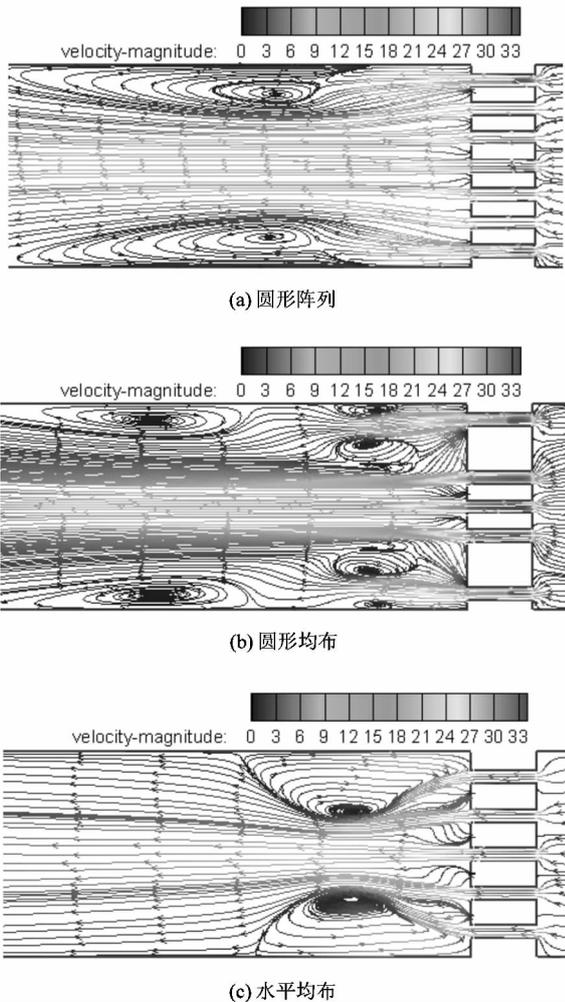


图3 流线速度矢量图/Pa

Figure 3 Velocity vector diagrams of flow line

板的空化流场中速度流线分布是不同的,圆形阵列孔板中产生的漩涡处于远离孔板的管壁边缘,圆形均布孔板则在距离孔板远近不同的位置处产生了多个漩涡,水平均布孔板产生的漩涡距离孔板较近,偏离管壁较远。

### 2.3 湍动能

湍动能的变化幅度体现了孔板空化强度的强弱。当流场中有空化现象发生时,流场会出现强烈扰动,湍动能急剧增加(见图4)。从图4可以看出,进入孔板前的流场湍动能很小,进入孔板后有所增加,在流出孔

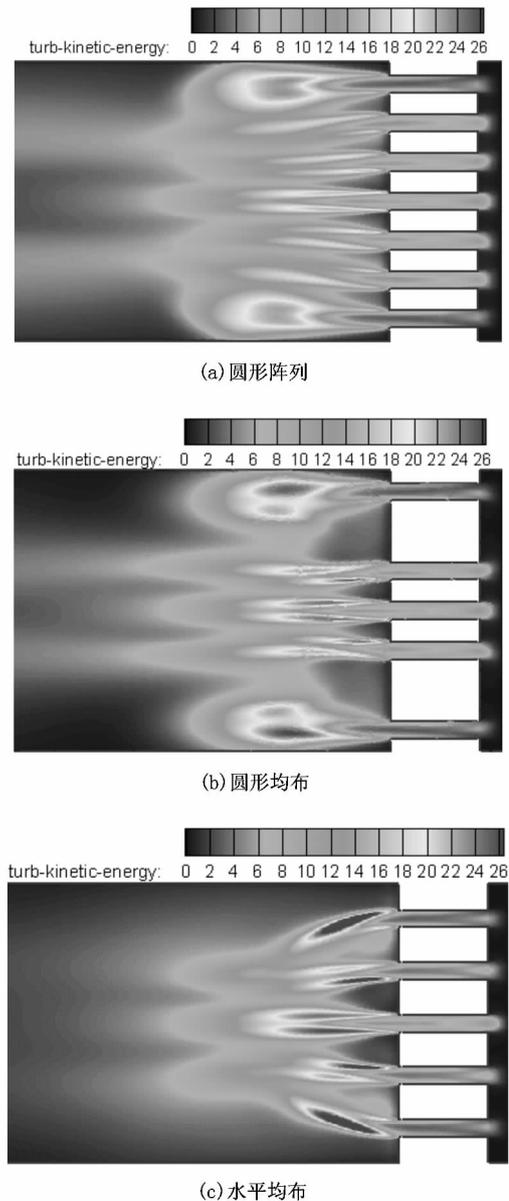


图4 流场对称面湍动能分布图

Figure 4 Turbulent kinetic energy distribution diagrams of symmetry plane in flow field

板后流场湍动能急剧增加,在距离孔板一定位置后湍动能达到最大,后逐渐减小。湍动能的增加是由空化现象引起的,空泡的产生和溃灭引起了流场的扰动,脉动压力增加,湍动能也相应升高。当流场远离空化区域后,湍动能逐渐降低,恢复到初始状态。模拟计算结果显示,孔板孔分布方式对对称面上的湍动能分布有

一定影响,其中水平均布多孔孔板中湍动能最大,圆形阵列多孔孔板中湍动能最小。

## 2.4 汽含率

图5给出了不同孔分布孔板对称面上汽含率分布的散点图,清楚地表明了汽含率的分布状况,图中横坐标为 $z$ 轴坐标,孔板位置处于0~10 mm之间。

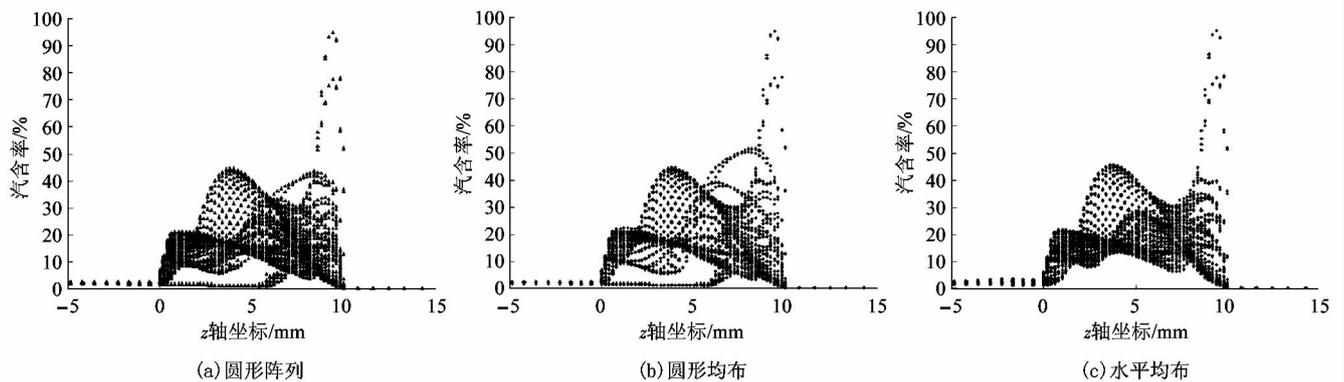


图5 流场对称面汽含率分布散点图

Figure 5 Gas fraction distribution diagrams of symmetry plane in flow field

从图5中可以看出,大部分空化发生在孔板孔内流域中,且高汽含率区域发生在孔板末端区域,汽含率最大值约100%,说明有部分区域接近完全汽化,但这种情况仅发生在孔末端很小的区域内。圆形均布孔板和圆形阵列孔板的汽含率散点图分布基本相似,但在 $z$ 轴坐标5~10 mm处,圆形均布孔板有部分汽含率明显高于圆形阵列孔板,这也是表1中圆形均布孔板平均汽含率高于圆形阵列孔板的主要原因。另外,在 $z$ 轴坐标0~6 mm区域内,圆形阵列和圆形均布孔板均存在一部分汽含率近似为0的区域,而水平均布孔板内部汽含率分布比较集中,大部分处于10%~50%之间,在整个孔板内不存在汽含率近似为零的区域。

## 3 结论

通过对圆形阵列、圆形均布以及水平均布3种多孔孔板的数值模拟计算以及对结果的分析,得出以下结论:①水平均布多孔孔板的空化效果优于圆形阵列和圆形均布多孔孔板,圆形均布多孔孔板空化效果好于圆形阵列多孔孔板;②孔分布方式对小孔处流速影响较小,但对孔板后临近壁面处漩涡产生的位置及数量有影响;③水平均布多孔孔板中湍动能最大,圆形阵

列多孔孔板中湍动能最小;④空化大部分发生在孔板小孔内流域中,且高汽含率区域发生在孔板末端。

## 参考文献(References):

- [1] GOGATE P R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes[J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(3): 335-358.
- [2] SIVAKUMAR M, PANDIT A B. Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2002(9): 123-131.
- [3] KALUMUCK K M, CHAHINE G L. The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(9): 465-470.
- [4] 卢晓江. 不同开孔率的多孔孔板水力空化装置的图像分析[J]. *轻工机械*, 2010, 28(3): 30-33.
- [5] 徐美娟, 王玉恒, 王启山. 多孔孔板水力空化器的优化和应用[J]. *南开大学学报: 自然科学版*, 2010, 43(6): 9-13.
- [6] 章昱, 李育敏, 计建炳. 孔板水力空化装置的模拟优化[J]. *化工时刊*, 2010, 24(11): 20-22.
- [7] HERBERT E, BALIBAR S, CAUPIN F. Cavitation pressure in water [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2006, 74(4): 41603-41625.
- [8] 王智勇. 基于FLUENT软件的水力空化数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.