

孔板通道结构参数对空化效应的影响

韩桂华^{1,2}, 洪健^{1,2}, 侯进军^{1,2}, 李大尉^{3,4},
赵孟石^{3,4}, 裴禹^{3,4}, 姚立明^{3,4}

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨卡仕达特机电科技有限公司, 哈尔滨 150080;
3. 黑龙江省科学院高技术研究院, 哈尔滨 1500014; 4. 黑龙江省对俄工业技术合作中心, 哈尔滨 150001)

摘要:孔板制作方便、易于更换,是产生水力空化效应的主要结构形式。为了研究孔板通道结构参数对空化效应的影响,通过 Fluent 软件建立孔板空化装置的仿真模型,得到孔板通道截面面积、孔分布方式、孔分散程度、孔板通道表面粗糙度对水力空化效果的影响规律,即,10 种孔板通道参数的气体体积流率随压差的变化曲线;并以亚甲基蓝溶液的空化效应为实验表征。结论表明:相同通道截面面积条件下,多通道比单通道的空化效果好;通道截面面积的增加可以有效提高空化效果;孔间距相近时,孔分布方式对空化效果无明显影响;孔分布方式不变时,孔分散程度越小对流体的空化效果越好;孔板通道表面低粗糙度可以促进空化。可为孔板结构参数优化提供基础。

关键词:空化效应;孔板通道;结构参数;亚甲基蓝溶液;气体体积流率

DOI:10.15938/j.jhust.2022.01.014

中图分类号: O427.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2022)01-0108-07

Influence of Orifice Channel Structure Parameters on Cavitation Effect

HAN Gui-hua^{1,2}, HONG Jian^{1,2}, HOU Jin-jun^{1,2}, LI Da-wei^{3,4},
ZHAO Meng-shi^{3,4}, PEI Yu^{3,4}, YAO Li-ming^{3,4}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Harbin Kashida Electromechanical Technology Co., Ltd., Harbin, 150080, China;

3. High Technology Research Institute of Provincial Science Institute, Harbin, 150001, China;

4. Heilongjiang Provincial Industrial and Technical Cooperation Center with Russia, Harbin 150001, China)

Abstract: The orifice was used for hydraulic cavitation with its manufacture and replacement easily. The orifice device cavitation simulation model was established under the Fluent software to study the influence between the structure parameters and the cavitation effect, such as the hole area, hole distribution, hole dispersion, and surface roughness. Then the change curves of the gas volume flow with pressure drop were gained, and the cavitation effect of the methylene blue solution was gained in an experiment. The conclusion shows that the cavitation effect of multiple channels is better than a single channel under the same hole area; the increase of the hole area can improve the cavitation effect; when the hole spacing is similar, the hole distribution mode has no obvious influence. When the distribution mode is unchanged, the smaller the degree of pore dispersion, the better the cavitation effect; the low surface roughness of hole can promote cavitation, and vice versa. It is the basis of orifice cavitation device parameters optimization.

Keywords: cavitation effect; orifice channel; structural parameter; methylene blue solution; vapor volume flow

收稿日期: 2021-03-16

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2016040); 国家自然科学基金(51375123); 黑龙江省科学院科学研究基金(KY2020GJS03).

作者简介: 韩桂华(1972—),女,博士,教授,硕士研究生导师;

侯进军(1994—),男,硕士研究生.

通信作者: 洪健(1996—),男,硕士研究生, E-mail: 2452720957@qq.com.

0 前言

水力空化技术是一种用物理手段使流体内部发生剧烈物理反应,并引发一系列化学反应的技术。其原理为液体在常温下流经节流装置时,流速会增加、压力会降低,当液体的局部压力降至饱和蒸气压及以下时,液体中的可溶性气体就会析出,形成相当数量的空化泡,低压区空化的液体会携带大量的空泡形成“两相流”运动,当流体压力增大时,空泡会在流动时瞬间溃灭(只有几微秒的时间)并产生高温(5 000 K)和瞬时高压(50 MPa),会形成强烈的冲击波和速度 70 ~ 180 m/s 的微射流,产生具有高化学活性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和强氧化剂双氧水(H_2O_2)。当其应用于污水时,与污水中的有机污染物发生氧化反应,空泡溃灭时的剪切力可以分解流体中的微生物等物质,因此,可以高效的处理多种有机污染物^[1-5]。空化效应是物理和化学反应共同作用的结果,能够产生此效应的结构类型有文丘里管式、孔板式、筒式、盘式等^[6]。

孔板式水力空化器结构简单,易于更换孔板,便于实验及研究,近年来国内外学者都对孔板的空化效应进行了一些研究。王永广^[7]针对 1 mm 和 5 mm 厚度的孔板,采用压力速度耦合方式进行流场计算,通过气含率、湍动能及流线速度矢量图得出,5 mm 厚度的孔板空化效果更好。韩伟^[8]通过数值分析,得出矩形孔口孔板的湍动能和雷诺应力远大于三角形孔和圆形孔,表明矩形孔口孔板的空化效果更好。钱锦远^[9]研究了孔板厚度、开孔率、有无中心孔以及孔间距等参数对气含率和压降的影响:薄壁孔板对流体压降影响较小,开孔率表现敏感,开中心孔使压降减少 10%;出口压力一定时,流速升高会抑制空化,出口压力低时整体气含率较高。Alister 等^[10]通过数值模拟研究了孔板厚度、孔径、孔口角度等参数对流体速度、压力梯度、气含率和湍动能量的影响:孔板厚度和孔径对空化效果影响显著。Jin 等^[11]建立了微孔板通道模型,通过数值模拟得出节流孔长度与直径之比(l/d)在不超过 1 的前提下, l/d 越大压差越大,空化效果越强,但是压差过大会降低流体流量,导致空化效率降低,需要适当增加出口压力保证空化效率。以上学者主要对孔板孔数、孔板厚度、孔间距、孔的形状以及孔径等参数进行研究,本文以此为基础,系列研究孔板通道截面粗糙度及面积变化、孔分布方式及分散程度对气相体积流率的影响。

在孔板空化效应应用实验方面,主要应用于分解有机物、物理改性、杀菌消毒以及强化化合物制备等方面^[12-15]。李志义等^[16]通过碘化钾分解、酵母

细胞破壁以及纤维素水解实验得出,水力空化对化学反应有良好强化作用。杨会中与张晓东等^[17-18]通过实验证明甲基蓝(MB)对空化产生的 $\cdot\text{OH}$ 有高度亲和力,极易生成无色产物羟化亚甲基蓝(MB-OH),利用紫外-可见分光光度计测出空化后的亚甲基蓝溶液的吸收光谱,根据 Beer 定律得出亚甲基蓝溶液浓度的变化所消耗的 MB 的量即为空化产生的 $\cdot\text{OH}$ 的量,能够准确的反应空化效果的好坏。并以此为依据进行空化效果的验证。

通过 Fluent 软件^[19-20]建立孔板空化装置仿真模型,将实际孔板通道参数代入,研究不同进出口压差下孔板通道截面积、孔分布方式、孔分散程度及通道表面粗糙度对气相体积流率的影响,并以亚甲基蓝溶液的空化效应为实验表征,验证上述影响规律,为孔板空化装置结构参数优化提供基础。

1 孔板通道内空化特性数值模拟

1.1 孔板通道建模

根据实验装置的结构尺寸建立数值模拟模型,剖视图如图 1 所示,为了便于观察流体状态,压力恢复区的管壁材料为有机玻璃,两端用法兰固定,更换孔板时便于拆装。

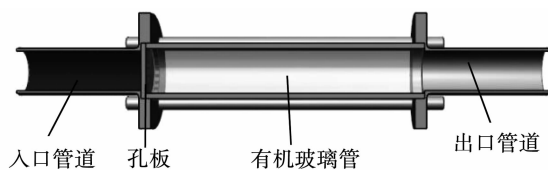


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

本次模拟所用的孔板类型如图 2 所示。

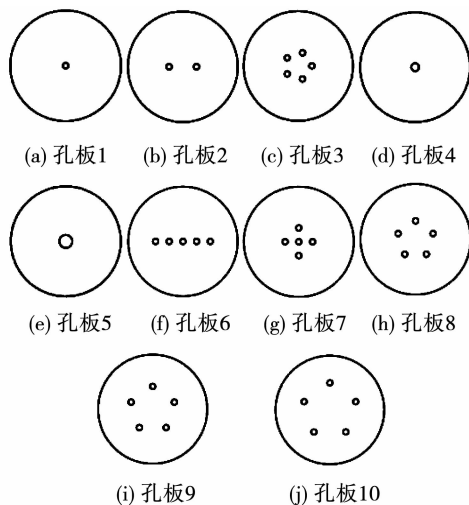


图 2 孔板类型

Fig. 2 Orifice plate type

以孔板 1 为例,建立流体三维模型,如图 3 所示。



图 3 流体模型
Fig. 3 Fluid model

由图 3 所示,流体控制容积分为 3 部分:入口段、孔板通道、出口段。入口段直径为 40 mm,长度为 30 mm;孔板通道长度为 5 mm;出口段直径为 50 mm,长度为 220 mm。不同参数的孔板通道的结构尺寸各异,其余控制容积尺寸皆相同。

用前处理软件 ICEM-CFD 对流体划分网格,以单孔通道为例,得到网格如图 4 所示。

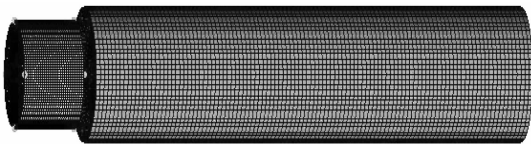


图 4 网格模型
Fig. 4 Mesh model

网格质量会影响计算收敛性,网格质量正常取值在 0~1 之间,比值 1 为理想网格;角度要求网格取值在 0°~90°之间,90°为理想网格,CFD 要求角度达到 18°以上。网格角度和质量检测如表 1、2 所示。

表 1 网格质量
Tab. 1 Mesh quality

网格质量	0.7 以上	0.8 以上	0.9 以上
占比/%	100	99.537	93.704

表 2 网格角度
Tab. 2 Mesh angle

网格角度	45°以上	65°以上	85°以上
占比/%	100	96.76	50.872

将 ICEM 生成的 .msh 格式网格文件导入 Fluent 中,各参数及边界条件设置如下:

1)求解形式:选择以压力为基础,时间类型为瞬态,重力加速度方向为 y 轴正方向,值为 9.81 m/s^2 ,操作环境温度为 300 K,环境压力为标准大气压 0.1 MPa。

2)湍流模型设置:混合相模型为 mixture,气相与液相之间有滑移,滑移模型为 schiller-naumann,阻力因子为 brucato,粘性模型选择可实现模型 (realizable $k-\varepsilon$),增强壁面处理方式选择 thermal effects。

3)流体为水 (water-liquid) 和水蒸气 (water-va-

por),水密度为 998.2 kg/m^3 ,黏度为 $0.001\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,水蒸气密度为 0.02558 kg/m^3 ,黏度为 $1.26\times10^{-6}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

4)空化模型设置:质量传输的首相为水,次相为水蒸气,空化模型选择 ZGB 模型 (zwart-gerber-belamri),饱和蒸气压设置为 3 540 Pa,自由蒸气温度为 300 K。空化核直径为 $1.0\times10^{-6}\text{ m}$,成核区域体积分数为 0.000 5,蒸发系数为 50,凝结系数为 0.01,湍动影响因子为 0.39。

5)边界条件:压力入口的湍动强度设置为 5%,水力直径设置为 40 mm,温度设置为 300 K。压力出口为 0 MPa,即大气压力,回流湍动强度为 5%,回流水力直径设置为 50 mm,温度为 300 K。

6)求解方法:选择压力隐式算法 (PISO),动量控制方程的离散格式采用计算精度较高的二阶迎风格式。

1.2 孔板通道内流体空化特性

有机玻璃管气穴图像如图 5 所示:



(a) 孔板1

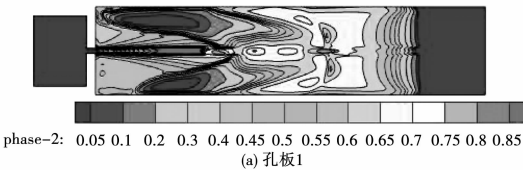


(b) 孔板3

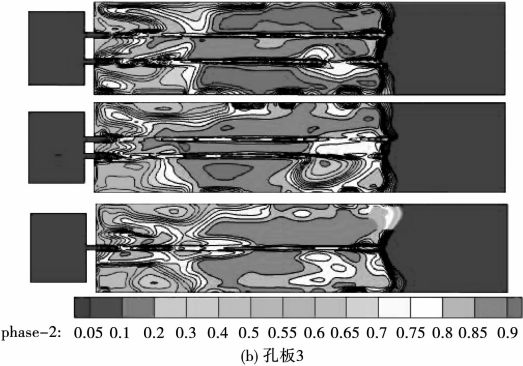
图 5 空化实验中的气相分布

Fig. 5 Gas phase distribution in cavitation experiment

数值模拟中的气相分布如图 6 所示:



(a) 孔板1



(b) 孔板3

图 6 气相分布云图

Fig. 6 Contours of vapor phase distribution

2 数值模拟

2.1 通道截面积对空化效果的影响

为了研究通道截面积对空化效果的影响,建立 2 种增加通道截面积的模型,如图 2 中的孔板 1、孔板 2、孔板 3、孔板 4 和孔板 5 所示,方式一:孔板通道直

径不变为 3 mm,增加通道数量,分别为两孔(孔板 2)和五孔(孔板 3);方式二:孔板通道数量不变,增加通道直径,使截面积分别增加到孔板 1 的 2 倍(孔板 4)和 5 倍(孔板 5),孔板 1 的通道截面积为 $2.25\pi\text{ mm}^2$ 。

通过改变入口压力探究压差对孔板通道内气相体积流率的影响,分析不同压差和孔板通道类型对空化效果的影响,气相体积流率如表 3 所示。

表 3 不同通道类型的气相体积流率
Tab. 3 Vapor phase volume flow rate of different channel types

孔板类型	气相体积流率/($10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)								
	0. 2 MPa	0. 3 MPa	0. 4 MPa	0. 5 MPa	0. 6 MPa	0. 7 MPa	0. 8 MPa	0. 9 MPa	1. 0 MPa
孔板 1	1. 25	1. 45	1. 66	1. 89	2. 01	2. 17	2. 31	2. 45	2. 58
孔板 2	1. 99	2. 35	2. 71	3. 02	3. 33	3. 55	3. 86	4. 10	4. 34
孔板 3	5. 75	6. 76	7. 78	8. 53	9. 27	10. 18	10. 89	11. 44	12. 19
孔板 4	1. 89	2. 14	2. 45	2. 71	2. 90	3. 14	3. 28	3. 47	3. 63
孔板 5	5. 40	6. 24	7. 22	8. 03	8. 79	9. 65	10. 21	10. 80	11. 42

气相体积流率与压差的关系如图 7 所示。

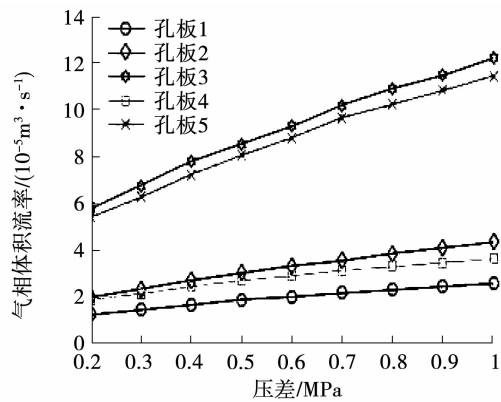


图 7 气相体积流率与压差的关系

Fig. 7 Vapor volume flow & pressure drop

由图 7 可知,随着压差变化,孔板 3 和孔板 5 的气相体积流率明显高于其余类型的孔板,说明通道截面积的增加可以有效提高空化效果。压差增加使气相体积流率不断上升,并且孔板 3 的气相体积流率皆高于孔板 5,孔板 2 的气相体积流率皆高于孔板 4,说明多通道比单通道更利于提高空化器的空化效果。由于空化产生于孔板通道内固体壁面附近,相同通道截面积条件下,多通道比单通道与流体的接触面积更大,使流体获得更大的空化区域,各孔板通道内壁面积如表 2 所示。

由表 4 可知,孔板 2 比孔板 4 的通道面积大,孔

板 3 比孔板 5 的通道面积大,所以孔板 2 的气相体积流率大于孔板 4 的,孔板 3 的气相体积流率大于孔板 5 的。

表 4 孔板通道内壁面积
Tab. 4 Inner wall area of orifice channel

孔板类型	孔板 1	孔板 2	孔板 3	孔板 4	孔板 5
通道面积	$3\pi h$	$6\pi h$	$15\pi h$	$4.24\pi h$	$7.81\pi h$

2.2 孔分布方式对空化的影响

出口压力设置为 0 MPa,即大气压力,入口压力为 0.2 ~ 1.0 MPa,孔板 3、孔板 6 和孔板 7 在不同压差条件下的气相体积流率如图 7 所示。

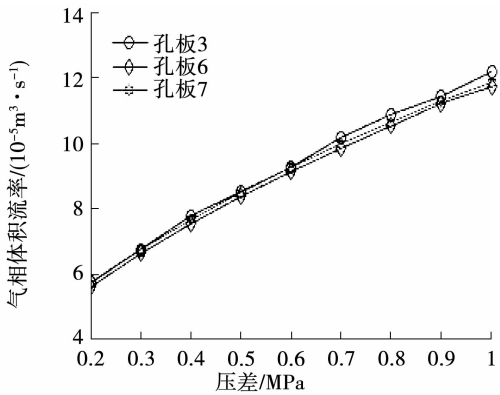


图 8 气相体积流率与压差的关系

Fig. 8 Vapor volume flow & pressure drop

由图 8 可知,随着压差升高,3 个孔板得到的气相体积流量不断上升,空化效果由大到小依次为孔板 3、孔板 7、孔板 6,但是除了在 0.7 MPa 时孔板 3 的气相体积流量较大,其余在各压差下的差值均小于 $0.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,说明在孔间距相近的条件下,孔分布方式对空化效果影响较小。

2.3 孔分散程度对空化的影响

不同压差条件下,不同孔分散程度的气相体积流量如图 9 所示。

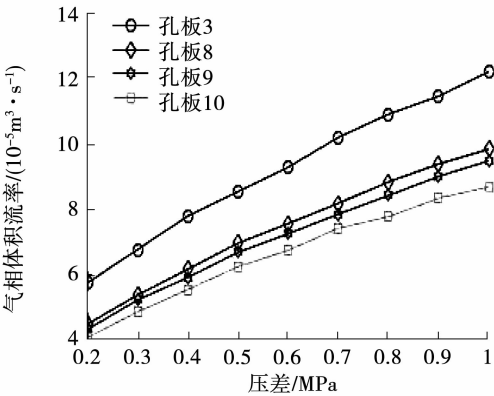


图 9 气相体积流量与压差的关系

Fig. 9 Vapor volume flow & pressure drop

由图 9 可知,随着压差升高,4 种孔板得到的气相体积流量不断上升,各孔板的气相体积流量从大到小依次为孔板 3、孔板 8、孔板 9、孔板 10,并且通过孔板 3 得到的气相体积流量明显高于其余孔板,说明孔分散程度越小,空化器的空化效果越好。

2.4 孔板通道表面粗糙度对空化效果的影响

出口压力设置为 0 MPa,即大气压力,入口压力为 0.2 ~ 1.0 MPa,孔板 1 不同表面粗糙度通道得到的气相体积流量如图 10 所示。

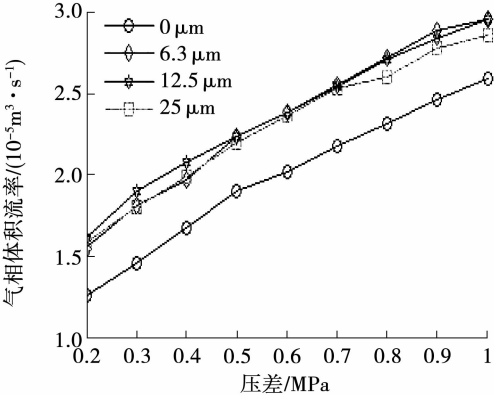


图 10 气相体积流量与压差的关系

Fig. 10 Vapor volume flow & pressure drop

由图 10 可知,表面粗糙度的增加提高了气相体积流量。在粗糙度为 6.3、12.5、25 μm 时,气相体积流量近似,压差为 0.2 ~ 0.6 MPa,粗糙度为 12.5 μm 孔板空化效果最好,压差为 0.7 ~ 1.0 MPa,粗糙度为 6.3 μm 孔板空化效果最好,说明 12.5 μm 的粗糙度适合低压空化,6.3 μm 的粗糙度适合高压空化,当粗糙度为 25 μm 时,气相体积流量明显降低,说明粗糙度过大降低了空化效果。

3 实验验证

3.1 实验装置

为了研究不同孔板结构和入口压力对空化器空化效果的影响,以亚甲基蓝溶液作为指示剂进行空化实验,空化过程中产生的 $\cdot\text{OH}$ 与亚甲基蓝溶液中的 MB 反应使其脱色,通过吸光度来验证空化的效果。水力空化装置如图 11 所示。

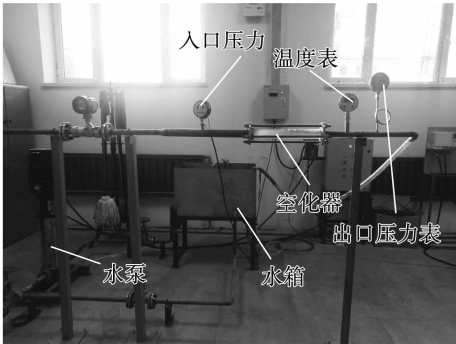


图 11 水力空化装置图

Fig. 11 Hydraulic cavitation device diagram

水力空化流程图如图 12 所示。

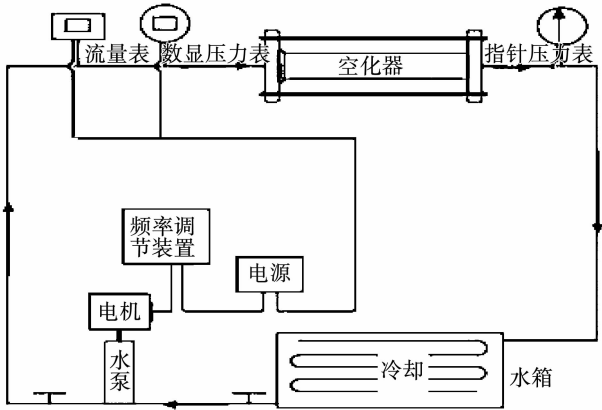


图 12 水力空化流程图

Fig. 12 Flow chart of hydraulic cavitation

溶液吸光度检测装置如图 13 所示。



图 13 溶液吸光度检测装置

Fig. 13 Solution absorbance detection device

3.2 孔板通道截面积对空化效应的影响

在压差分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 MPa 条件下, 分别用孔板 1、孔板 2、孔板 3、孔板 4 和孔板 5 对亚甲基蓝溶液进行空化实验,空化时间为 60 min,每个压力下分别取 3 个样本检测吸光度取平均值,计算出 ·OH 的浓度,如表 3 所示。

表 5 通道截面积与羟基浓度的关系

Tab. 5 Channels section area & ·OH

孔板类型	羟基浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			
	0.3 MPa	0.5 MPa	0.7 MPa	0.9 MPa
孔板 1	11.98	15.31	17.87	19.31
孔板 2	17.97	22.63	27.30	30.63
孔板 3	33.95	36.62	37.95	39.28
孔板 4	17.31	22.63	26.63	29.29
孔板 5	29.29	33.29	36.62	37.28

不同压差条件下,各孔板得到的 ·OH 浓度变化曲线如图 14 所示。

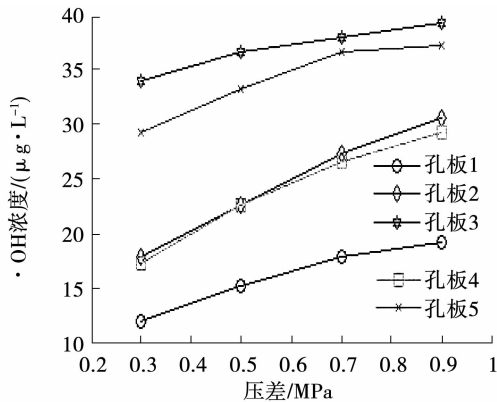


图 14 羟基浓度与压差的关系

Fig. 14 ·OH & pressure drop

由图 14 可知,相对于孔板 1,2 种增加通道截面积的方式皆提高了 ·OH 浓度,相同通道截面积条件下,孔板 2 的得到 ·OH 浓度要高于孔板 4 的,孔板 3 得到 ·OH 浓度要高于孔板 5 的,孔板 2 和孔板

4 得到的 ·OH 浓度差为 0 ~ 1.34 $\mu\text{g}/\text{L}$,孔板 3 和孔板 5 得到的 ·OH 浓度差为 1.33 ~ 4.66 $\mu\text{g}/\text{L}$,说明多通道孔板的空化效应更强。

3.3 孔分布方式对空化效应的影响

以孔板 3 作为参考,在压差分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 MPa 条件下用孔板 6 和孔板 7 对 MB 溶液进行空化实验,孔板 6 的孔为一字型分布,孔板 7 为有中心孔的环形均匀分布,空化时间为 60 min,得到的 ·OH 浓度变化曲线如图 15 所示。

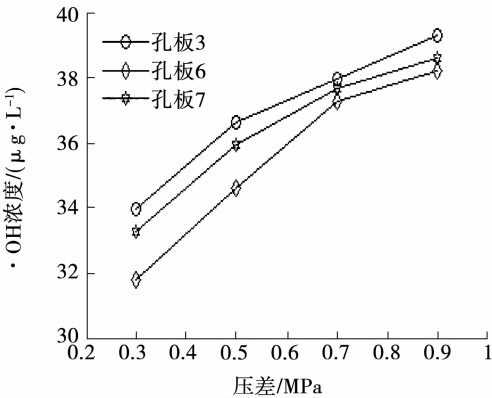


图 15 羟基浓度与压差的关系

Fig. 15 ·OH & pressure drop

由图 15 可知,随着压差增加得到的 ·OH 浓度不断增加,通过孔板 6 和孔板 7 得到的 ·OH 浓度皆比孔板 3 的低,在压差为 0.9 MPa 时得到的 ·OH 浓度最大,并且孔板 3 比孔板 6 的高 1.06 $\mu\text{g}/\text{L}$,比孔板 7 的高 0.66 $\mu\text{g}/\text{L}$,说明孔间距相同的条件下,孔分布方式的改变降低了空化效果,但是影响较小。

3.4 孔分散程度对空化效应的影响

孔板 3、孔板 8、孔板 9 和孔板 10 的孔分散程度依次增加,在压差分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 MPa 条件下用各孔板对 MB 溶液进行空化实验,空化时间为 60 min,得到 ·OH 浓度变化曲线如图 16 所示。

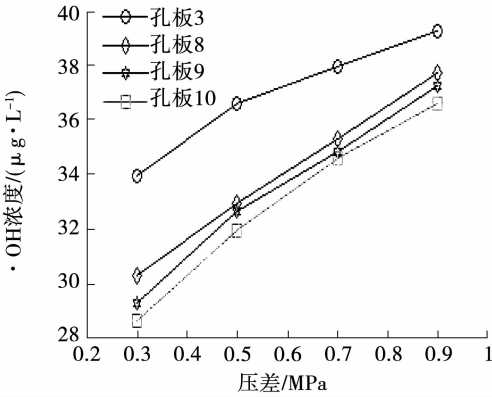


图 16 羟基浓度与压差的关系

Fig. 16 ·OH & pressure drop

由图 16 可知,随着压差增加,·OH 浓度不断增加,孔分散程度越大得到的·OH 浓度越小,各孔板空化器得到的·OH 浓度由大到小依次为孔板 3、孔板 8、孔板 9、孔板 10,并且孔板 3 得到的·OH 浓度明显比其余孔板高,说明孔分散程度越小空化效果越好,孔分散到一定程度时空化效果相似。

通过以上实验,所得的孔通道截面积、孔的分布方式以及孔分散程度对空化效应影响规律与仿真的结果相符,故认为仿真结果可信。

4 结 论

采用数值模拟和实验验证的方法,研究了孔板通道结构参数对空化效应的影响规律,得出以下结论:

1) 在 0.3 ~ 0.9 MPa 范围内孔板通道内气相体积流率随着压差增加而增加;

2) 相同通道截面积条件下,气相体积流率大小为孔板 2 大于孔板 4,孔板 3 大于孔板 5,表明多通道比单通道的空化效果好;

3) 随着压差增加,孔板 3 和孔板 5 的气相体积流率明显高于其余类型的孔板,说明通道截面积的增加可以有效提高空化效果;

4) 孔间距相近时,孔分布方式对空化效果无明显影响;孔分布方式不变时,孔分散程度越小对流体的空化效果越好。

5) 孔板通道表面低粗糙度可以促进空化,高粗糙度抑制空化,压差在 0.2 ~ 0.6 MPa 时最佳值为 12.5 μm ,在 0.7 ~ 1.0 MPa 时最佳值为 6.3 μm 。

参 考 文 献:

- [1] JOSHI R, GOGATE P R. Degradation of Dichlorvos Using Hydrodynamic Cavitation Based Treatment Strategies [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(3): 532.
- [2] MANISHA V, BAGAL, PARAG R. Degradation of 2,4-dinitrophenol Using A Combination of Hydrodynamic Cavitation, Chemical and Advanced Oxidation Processes [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2013, 20(5): 1226.
- [3] VIRENDRA K S, MANAV A R, AQEEL A M, et al. Effect of Geometry of Hydrodynamically Cavitating Device on Degradation of Orange-G [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2013, 20(1): 345.
- [4] ILGYU L, HAN J P. The Effects of Waste-activated Sludge Pretreatment Using Hydrodynamic Cavitation for Methane Production [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2013, 20(6): 1450.
- [5] 邵俊鹏,刘亚楠,文丘里管内空化效果影响因素研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2020, 25(3): 122.

- [6] 袁惠新,王赞冰,付双成. 空化技术研究现状与发展趋势[J]. *化工机械*, 2019, 46(2): 115.
- YUAN Huixin, WANG Yunbing, FU Shuangcheng. Research Status and Development Trend of Cavitation Technology [J]. *Chemical Machinery*, 2019, 46(2): 115.
- [7] 王永广. 水力空化水处理设备结构设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [8] 韩伟. 空化区掺气泡与空泡相互作用及紊动空化特性的试验研究和数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [9] 钱锦远. 含阻系统中多孔板的流动分析及其工业应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [10] ALISTER S, VIVEK V R. Modelling of Hydrodynamic Cavitation with Orifice; Influence of Different Orifice Designs [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 136: 698.
- [11] JIN Zhijiang, GAO Zhixin, LI Xiaojuan et al. Cavitating Flow through A Micro-Orifice [J]. *Micromachines*, 2019, 10(3): 191.
- [12] MANICKAM S, ANIRUDDHA B P. Wastewater Treatment: A Novel Energy Efficient Hydrodynamic Cavitation Technique [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2002, 9(3): 123.
- [13] 田甜, 江中洋, 王中江, 等. 射流空化对大豆分离蛋白-磷脂酰胆碱乳化特性的影响 [J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 99.
- TIAN Tian, JIANG Zhongyang, WANG Zhongjiang, et al. Effect of Jet Cavitation on Soy Protein Isolate-Phosphatidylcholine Emulsion Properties [J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 99.
- [14] BURZIO E, BERSANI F, CARIDI G, et al. Water Disinfection by Orifice-induced Hydrodynamic Cavitation. [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60: 104740.
- [15] MANDAR P B, PARAG R G, ANIRUDDHA B P, et al. Hydrodynamic Cavitation as A Novel Approach for Delignification of Wheat Straw for Paper Manufacturing [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2014, 21(1): 162.
- [16] 李志义, 张晓冬, 刘学武, 等. 水力空化及其对化工过程的强化作用 [J]. *化学工程*, 2004(4): 27.
- LI Zhiyi, ZHANG Xiaodong, LIU Xuewu, et al. Hydraulic Cavitation and Its Strengthening Effect on Chemical Process [J]. *Chemical Engineering*, 2004(4): 27.
- [17] 杨会中. 水力空化强化效应实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [18] 张晓冬, 杨会中, 李志义. 水力空化强度与空化自由基产量的关系 [J]. *化工学报*, 2007(1): 27.
- ZHANG Xiaodong, YANG Huizhong, LI Zhiyi. Relationship between Strength of Hydrodynamic Cavitation and Amount of Induced Hydroxyl Radical [J]. *Ciesc Journal*, 2007(1): 27.
- [19] 邵俊鹏, 徐龙飞, 孙桂涛. 伺服驱动液压缸静压导向套温度场 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2020, 25(4): 56.
- SHAO Junpeng, XU Longfei, SUN Guitao. Temperature Field of Hydrostatic Guide Sleeve of Servo Driven Hydraulic Cylinder [J]. *Journal of Harbin University of Technology*, 2020, 25(4): 56.
- [20] 杨春梅, 曹炳章. 空气静压轴承的参数设计与性能优化 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2020, 25(4): 48.
- YANG Chunmei, CAO Bingzhang. Parameter Design and Performance Optimization of Aerostatic Bearings [J]. *Journal of Harbin University of Technology*, 2020, 25(4): 48.

(编辑: 温泽宇)