

孔板空化器纯水空化效应实验

韩桂华¹, 赵恩玉¹, 李大尉², 赵志伟¹, 陈林秋¹, 朱宜鹏¹

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省科学院高新技术研究院, 哈尔滨 150020)

摘要:为了研究孔板结构参数对空化效应的影响,以孔板式空化器为例,依据气泡动力学理论,建立孔板内气液两相动态空化模型,推导出孔板通道及出水口流量方程。采用实验的方法,在初始操作参数条件下,固定出口压力为0 MPa,调节入口压力,在入口压力与出口压力压差值0.2 MPa~1 MPa范围内,以0.1 MPa等差值递增共实验九次,改变孔板厚度、孔数、孔型结构,以水的物化性质电导率为表征手段,以溶解氧作为辅证,研究孔板结构参数对空化效应的影响。结果表明:随着入口压力的升高,液体的空化强度越强,且当入口压力达到一定值时,空化强度趋于稳定;改变孔板厚度,压差在0.2 MPa~0.9 MPa内,8 mm孔板的电导率达到140.54 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳,压差在0.9 MPa~1 MPa内,10 mm孔板的电导率达到142.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳;改变孔板孔数,压差在0.2 MPa~0.6 MPa内,五孔孔板的电导率达到136.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳,压差在0.6 MPa~1 MPa内,三孔孔板的电导率达到141.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳;改变孔型结构,压差在0.2 MPa~1 MPa内,孔型对孔板空化强度的影响微弱,整体圆形空化效果最好,方形次之,三角形最差。

关键词:孔板;纯水;空化效应;溶解氧;电导率

DOI:10.15938/j.jhust.2023.05.014

中图分类号: O427.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)05-0110-08

Cavitation Effect of Pure Water on Orifice Plate

HAN Guihua¹, ZHAO Enyu¹, LI Dawei², ZHAO Zhiwei¹, CHEN Linqiu¹, ZHU Yipeng¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Institute of Advanced Technology Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150020, China)

Abstract: In order to study the influence of structural parameters of orifice plate on cavitation effect, a gas-liquid two-phase dynamic cavitation model in orifice plate was established based on bubble dynamics theory, and the flow equations of orifice plate passage and outlet were derived. Under the initial operating parameters, the outlet pressure was fixed at 0 MPa, and the inlet pressure was adjusted. The pressure difference between the inlet pressure and outlet pressure was 0.2 MPa~1 MPa, and the equal difference value of 0.1 MPa was incremented for nine times. The thickness of the orifice plate, the number of holes and the pore structure were changed. The effect of structural parameters of orifice plate on cavitation effect was studied. The results show that the cavitation strength of liquid becomes stronger with the increase of inlet pressure, and tends to be stable when the inlet pressure reaches a certain value. By changing the thickness of orifice plate, the conductivity of 8mm orifice plate reaches 140.54 $\mu\text{S}/\text{cm}$ when the pressure difference is between 0.2 MPa and 0.9 MPa, and the conductivity of 10 mm orifice plate reaches 142.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ when the pressure difference is between 0.9 MPa and 1 MPa. Changing the number of holes in the orifice plate, the conductivity of the five-hole plate is 136.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ when the pressure difference is between 0.2 MPa~0.6 MPa, and the conductivity of the three-hole plate is 141.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ when the pressure difference is between 0.6 MPa~1 MPa. Changing the pass structure, the pore structure and the pressure difference between 0.2 MPa~1 MPa, the influence of the pore shape on the cavitation strength of the orifice plate is weak, and the overall circular cavitation is the best, followed by the square one and the triangle one.

Keywords: orifice plate; pure water; cavitation effect; dissolved oxygen; electrical conductivity

收稿日期: 2022-04-07

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: 赵恩玉(1997—),女,硕士研究生;

李大尉(1982—),男,副研究员。

通信作者: 韩桂华(1972—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,E-mail:641544105@qq.com。

0 引言

空化现象是一种发生在液体介质中剧烈的物理现象^[1],其原理为液体在常温下流经节流装置时,流速增加、压力降低^[2],当液体的局部压力降至饱和蒸气压^[3]及以下时,液体中的可溶性气体就会析出形成气核^[4],随着压力不断升高,气泡会不断增长直至溃灭^[5]。该过程会释放大量能量,因此水力空化技术得到广泛研究,已经应用在水消毒^[6]、纳米材料合成^[7]、废物活性污泥处理^[8]、乳化^[9]、细胞破坏^[10]、生物燃料合成以及清洗管道^[11]等多个方面。

空化过程中产生巨大的空化效应,在空化效应对溶液的物化性质方面,研究发现空化过程中产生巨大的剪切力,将污水中有机大分子打碎成小分子,使污水中化学需氧量增高,另一方面有机小分子矿化形成矿物盐,增大离子浓度,使得污水的电导率也逐渐增加^[12];剪切力还使污泥中的微生物细胞和絮状体破碎,产生离子并使PH值升高^[13]。空化过程中气核不断增多,加强了流场空化强度,过氧化氢含量增加,其中 O_2 作为反应物不断被消耗,溶解氧逐渐降低^[14]。黄永春在探究水力空化对原糖溶液表面张力的影响发现,随着空化时间增长,使得原糖溶液中的胶体粒子的水化层破坏,分子间作用力减弱,表面张力逐渐降低^[15]。

在空化强度表征方面,大多数学者通过检测空化过程中产生 $\cdot OH$ 浓度的变化间接表征流场空化强度的变化,为数值模拟的验证和评价提供依据^[16-17]。中北大学的杨思静等^[18]利用空化前后亚甲基蓝溶液吸光度的变化,来推算空化过程中产生羟基的浓度,以此作为空化强度的表征手段。

通过大量实验,研究了空化过程中不同溶液的物化性质的变化情况,结果表明溶液的物化性质能较好地表征空化强度,同时空化效应的强弱与水物化性存在关联性,因此本文以纯水作为空化介质,孔板式^[19]空化器为例,探究孔板厚度、孔数、孔型对孔板空化器内空化特性的影响,并以水中溶解氧来表征空化强度,以电导率加以辅证。

1 空化通道内流体流量方程推导

孔板空化器内流体流过孔板时,流体的流速与

压力出现明显的变化。如图1所示,充满管道的流体由界面1流至界面2时,流体的压力由 p_1 降低到 p_2 ,平均流速由 u_1 增加至 u_2 ,两截面间形成了压差。流体流过界面2后,压力升高,流速降低,到达截面3时,流场的分布恢复了均匀状态。但是在流场中阻力的作用下,流体的压力 p_3 并没有恢复到 p_1 ,流体的压力损失^[20]为 $\Delta\omega = p_1 - p_3$ 。

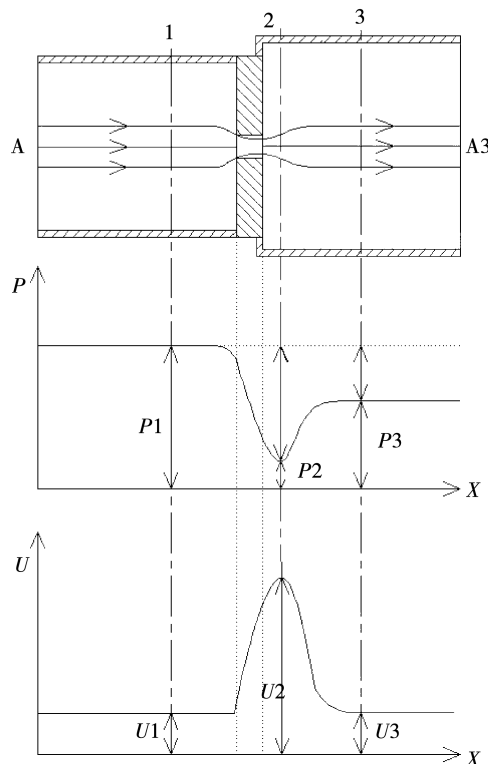


图1 孔板附近的流体流速与压力变化情况

Fig. 1 Changes in fluid velocity and pressure near the orifice

在孔板空化器内,截面1与截面2处于同一水平线上,两截面处的势能相等,因此伯努利方程与流体连续性方程可以表示为

$$\frac{p_1}{\rho} + c_1 \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + c_2 \frac{u_2^2}{2} + \xi \quad (1)$$

$$A u_1 = A_2 u_2 \quad (2)$$

式中: A 为管道的入口面积; A_2 为截面2处的通流面积; ρ 为流体的密度; u_1 、 u_2 为截面1、2处流体的平均流速; c_1 、 c_2 为平均流速的动能修正系数; ξ 为能量损失系数。

由式(1)和(2)可得截面2处的平均流速为

$$u_2 = \sqrt{\frac{2(p_1' - p_2')}{\rho(c_2 + \xi - c_1 \frac{A_2^2}{A^2})}} \quad (3)$$

式中: p'_1, p'_2 为截面 1、2 处流体的平均压力。

对于截面 2 处的通流面积 A_2 是无法进行测量的, 这里用孔板的开孔面积 A_1 来表示。

$$A_2 = \mu A_1 \quad (4)$$

式中 μ 为收缩系数。

定义孔板截面 1 处与截面 2 处的等效直径之比为 β , 公式为

$$\beta = \frac{r}{R} = \sqrt{\frac{\pi r^2}{\pi R^2}} = \sqrt{\frac{A_1}{A}} \quad (5)$$

式中 R, r 分别为截面 1、2 的等效直径。

将式(4)与式(5)代入式(3)求解得:

$$\mu_2 = \frac{1}{\sqrt{c_2 + \xi - c_1 \mu^2 \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta p'}{\rho}} \quad (6)$$

在实际应用中, 实际测量的截面 1、2 处的压差 Δp 与平均压力差 $\Delta p'$ 是存在差异的, 对此要引入 ψ 进行补偿, 其中 ψ 为取压系数。即:

$$\psi = \frac{\Delta p}{\Delta p'} \quad (7)$$

由式(4)~式(7)可得孔板通道处流体的流量方程为

$$q_v = u_2 A_2 = u_2 \mu A_1 = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{c_2 + \xi - c_1 \mu^2 \beta^4}} \beta^2 A \sqrt{\frac{2 \Delta p'}{\rho}} \quad (8)$$

由图 1 可知, 在流场中阻力的作用下, 流体压力 p_3 并没有恢复到 p_1 , 流体内存在压力损失。根据截面 2、3 的流体状态列动量方程:

$$p_2 A_2 + p_2 (A - A_2) - p_3 A = \rho q_v (u_3 - u_2) \quad (9)$$

压力损失为

$$\Delta \varpi = p_1 - p_3 \quad (10)$$

由式(1)与式(8)~式(10)可得压力损失:

$$\Delta \varpi = \left(1 + \frac{2\mu\beta^2(\mu\beta^2 - 1)}{c_2 + \xi - c_1\mu^2\beta^4}\right) \Delta p = \left(1 + \frac{2\mu\beta^2(\mu\beta^2 - 1)}{c_2 + \xi - c_1\mu^2\beta^4}\right) \psi \Delta p \quad (11)$$

同理可推导出图 1 中截面 3 处的流量方程为

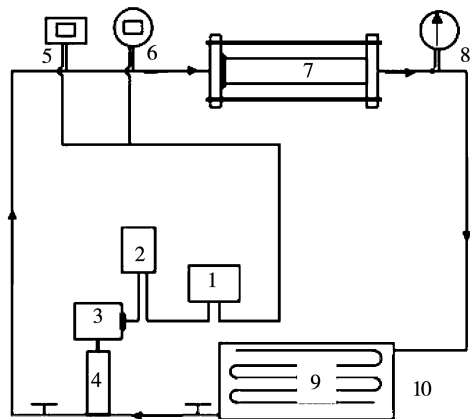
$$q_3 = \frac{A_3}{\sqrt{c_3 + \xi - c_1\mu^2\beta^4}} \cdot \sqrt{\left(2 + \frac{4\mu\beta^2(\mu\beta^2 - 1)}{\rho(c_2 + \xi - c_1\mu^2\beta^4)}\right) \Delta p'} \quad (12)$$

式中: c_3 为 u_3 的动能修正系数; A_3 为出水口通流面积。

2 孔板空化实验

2.1 实验装置

为了完成水力空化实验, 由黑龙江省科学院高新技术研究院提供了一套孔板式水力空化循环系统, 实验装置的结构图如图 2 所示。



1. 电源 2. 频率调节装置 3. 电机 4. 水泵 5. 流量表 6. 数显压力表 7. 空化器 8. 指针压力表 9. 冷却 10. 水箱

图 2 孔板式空化器结构图

Fig. 2 Structure drawing of hole plate cavitation

该实验装置采用 YE2-200L1-2 型三相异步电动机, 功率 30 kW, 额定电压 380 V, 额定电流 55.4 A, 转速 2 950 r/min, 额定频率 50 Hz, 电动机定子绕组 Δ 连接方式。水泵参数流量 25 m³/h, 转速 2 950 r/min, 扬程 120 m, 吸程 4 m。频率调节装置 41 Hz, 数显压力表 0.51 MPa。空化装置选用的孔板如图 3 所示。

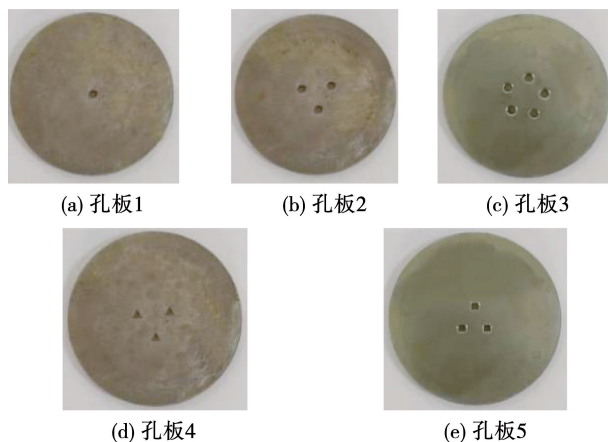


图 3 孔板类型

Fig. 3 Orifice type

由图 2、3 可见,孔板空化器内的流体由 3 部分组成:入口段(长度为 35 mm,直径为 45 mm)、孔板通道(长度为 5 mm)、出口段(长度为 190 mm,直径为 60 mm)。孔板 1、2、3 的圆孔直径均为 3 mm;孔板 4 为边长 3.5 mm 的正三角形孔;孔板 5 为边长 3 mm 的正方形;多孔孔板的孔间距约为 7.6 mm。

2.2 实验步骤

- 1)向水箱内注入自来水,开启水泵运行 2 min,去除杂质;
- 2)再次注水,每隔一定时间,从出水管进行取样,水样进行水浴恒温;
- 3)固定出口压力为 0 MPa,调节入口压力,入口压力与出口压力差值为压差,控制压差在 0.2 MPa~1 MPa 范围内,以 0.1 MPa 等差值递增,具体为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa…1 MPa 实验 9 次。完成一个压差后,改变入口压力重复上述实验操作;
- 4)结束一个孔板所有压力的实验,关闭电机,空化反应器更换孔板,重复上述实验操作。

2.3 正交试验优化操作参数

在空化实验过程中,操作参数同样对空化介质的性质具有很大的影响,主要为空化时间、介质初始温度、时效对空化水的电导率、溶解氧的影响。在考虑单因素的情况下,随着空化时间的增加,水溶液的电导率会逐渐升高,水溶液的溶解氧因氧气的消耗而逐渐降低,最终趋于稳定,继续增加空化时间只会产生无用的工作量;在一定范围内升高水的初始温度,有助于孔板通道内气核的析出,促进空泡内化学反应的发生,但温度过高不利于观察其性质的变化规律;空化水样在放置一段时间后,测得其稳定后的性质可保证实验的准确性。

空化时间、介质初始温度、时效等因素均对水溶液的性质有着不同的影响,故根据现有实验设备设计操作参数组合的正交试验,以五孔孔板为参考,在 0.6 MPa 压差下进行实验,水平因素见表 1,按照 L9(3³) 正交表进行实验,正交试验结果见表 2。

表 1 操作参数正交试验水平因素

Tab. 1 Operating parameters orthogonal test level factors

水平	1	2	3
空化时间 A/min	30	60	90
介质初始温度 B/℃	10	15	20
时效 C/min	10	20	30

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Orthogonal test results

序号	A	B	C	电导率变化量/ (μS/cm)
1	30(1)	10(1)	10(1)	14.78
2	30(1)	15(2)	20(3)	14.84
3	30(1)	20(3)	30(2)	14.46
4	60(2)	10(1)	20(3)	20.66
5	60(2)	15(2)	30(2)	22.02
6	60(2)	20(3)	10(1)	21.92
7	90(3)	10(1)	30(2)	18.24
8	90(3)	15(2)	10(1)	18.88
9	90(3)	20(3)	20(3)	17.66
K ₁	14.69	17.89	18.53	—
K ₂	21.53	18.58	18.24	—
K ₃	18.26	18.01	17.72	—
极差 R	6.84	0.69	0.81	—
较优水平	A ₂	B ₂	C ₁	—

由表 1 可知,影响电导率变化范围最大的因素是空化时间,故将其控制在有效水平,根据 K 值可知 A₂(60 min)为其最佳水平;第 2 影响因素为介质的初始温度,其最佳水平为 B₂(15℃);对电导率影响最小的因素是水样放置时间,最佳水平为 C₁(10 min)。以上参数组合作为纯水介质水空化实验的最佳操作参数方案。

后续水性质空化效果实验中,空化时间以 60 min 为最长空化时间,初始温度采用 15℃,测试水样电导率时效为 10 min。

2.4 孔板厚度对空化效应的影响

实验用水的初始温度为 15℃,采用 5 mm、8 mm、10 mm 厚度的孔 3(五孔)孔板以 0.1 MPa 等差值递增,在 0.2 MPa~1 MPa 压差范围内分别进行九次空化实验,空化时间为 60 min,每个水样等量分成三份放置 10 min 待其稳定后进行测量,取其电导率、溶解氧的平均值并记录实验数据,整理得到水的电导率随压差的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可知,对比不同厚度孔板的电导率随压差的变化可以发现,电导率总体呈上升趋势,在 0.2 MPa~0.8 MPa 压差下,电导率(8 mm)>电导率

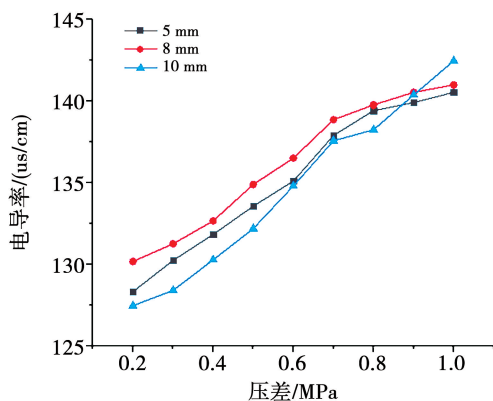


图4 电导率随压差的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of conductivity with differential pressure

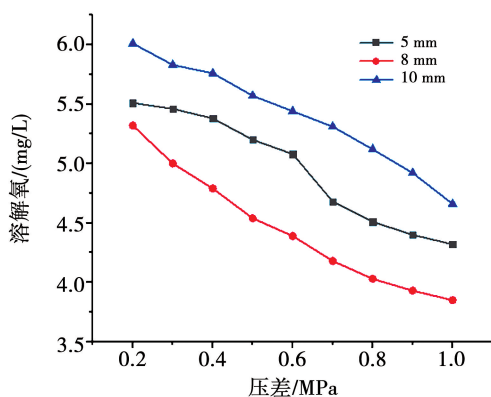


图5 溶解氧随压差的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of dissolved oxygen with differential pressure

(5 mm) > 电导率(10 mm), 说明厚度为8 mm孔板的空化效果最佳, 0.8 MPa ~ 1 MPa时, 上升趋势变缓, 当压差大于0.8 MPa时, 10 mm孔板电导率恢复上升趋势, 当压差在1 MPa时, 电导率为142.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 达到最佳, 说明10 mm孔板适合高压空化。分析原因: 空化本质是气核不断长大直至溃灭的过程, 压差在0.2 MPa ~ 0.8 MPa时, 厚度为5 mm孔板产生的气核少于厚度为8 mm孔板产生的气核, 显然8 mm的孔板空化效果要优于5 mm孔板, 厚度为10 mm的孔板产生气核更多, 但气核越多, 通过孔板的沿程损失越大, 气核刚产生就发生溃灭, 释放的能量较少, 故8 mm厚度的孔板效果最好; 压差在0.8 MPa ~ 1 MPa时, 高速射流中气核发育不充分, 在流场内未能及时溃灭, 且由于气泡的存在使溶液的导电性降低, 故电导率增速变缓, 随着压差升高, 产生气核越多, 沿程损失越大, 而10 mm的孔板相对较厚, 空化区域较大, 随着压差不断增大, 孔板越厚空化效果越好。

水的溶解氧随压差的变化规律如图5所示。由图5可知, 纯水在空化装置的作用下, 水的溶解氧随着压差的升高逐渐降低, 这是因为随着压差的升高, 空化强度逐渐变强, 空泡溃灭释放的高温高压促使 O_2 裂解成为 $\cdot\text{O}$ 参与反应, 化学效应的正反应逐渐变强, O_2 的消耗量逐渐增加, 使水中的溶解氧含量逐渐降低; 对比不同厚度孔板的溶解氧随压差的变化可以发现, 不同厚度孔板的溶解氧在相同压差下呈现出, 压差(8 mm) < 压差(5 mm) < 压差(10 mm), 最小差值达到0.19 mg/L, 说明8 mm孔板的空化效果最佳, 10 mm孔板的空化效果最差。

2.5 孔板孔数对空化效应的影响

实验用水的初始温度为15 $^{\circ}\text{C}$, 采用厚度为8 mm的图3中的孔1(单孔)、孔2(三孔)、孔3(五孔)的孔板以0.1 MPa等差值递增, 在0.2 MPa ~ 1 MPa压差范围内分别进行9次空化实验, 空化时间为60 min, 每个水样等量分成三份放置10 min待其稳定后进行测量, 取其电导率、溶解氧10次数据的平均值并记录实验数据, 整理得到水的电导率随压差的变化规律如图6所示。

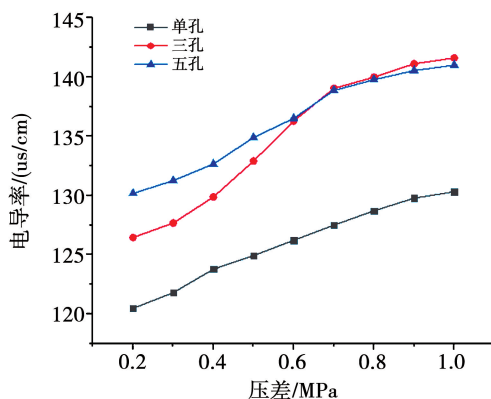


图6 电导率随压差的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of conductivity with differential pressure

由图6可知, 电导率随压差总体呈上升趋势, 随着压差的升高, 空化强度逐渐变强, 水中化学反应平衡偏移, 性质活泼的物质增多, 水中易产生新的带电粒子或原有带电粒子电荷数增加, 致使水的电导率逐渐升高。压差在0.2 MPa ~ 0.7 MPa时, 五孔的空化强度最佳; 当压差在0.7 MPa ~ 1 MPa时, 3种孔

板的电导率值表现为:三孔 > 五孔 > 单孔,说明三孔孔板的空化效果最佳适合高压空化。分析原因:单孔孔板在流量和流速方面都弱于三孔孔板和五孔孔板,空化效果差,故电导率差距较大;压差在 0.2 MPa ~ 0.7 MPa 时,五孔孔板流量大于三孔孔板和单孔孔板,流量越大,过流系数越大,空化效果越好;压差在 0.7 MPa ~ 1 MPa 时,随着压差不断升高,三孔孔板流速大于五孔孔板,根据能量守恒方程,动能越大,压力势能越小,当小于饱和蒸气压时,即产生空化现象,故压差越大,三孔孔板空化效果越好。

水的溶解氧随压差的变化规律如图 7 所示。由图可知,不同孔数的溶解氧随着压差的升高逐渐降低,这是因为随着压差不断升高,空化强度逐渐变强,空泡溃灭释放的高温高压促使 O_2 裂解成为 $\cdot O$ 参与反应,化学效应的正反应逐渐变强, O_2 的消耗量逐渐增加,使水中的溶解氧含量逐渐降低;且单孔、三孔、五孔孔板的溶解氧降幅分别为:0.91 mg/L、1.69 mg/L、1.47 mg/L,压差在 0.2 MPa ~ 0.9 MPa 时,五孔的溶解氧略小于三孔孔板的溶解氧值,说明五孔孔板效果更优;压差在 0.9 MPa ~ 1 MPa 时,三孔的溶解氧达到最低 3.79 mg/L,说明三孔孔板效果更优,更适合于高压空化。以上结果表明孔数对孔板空化强度影响较为显著。

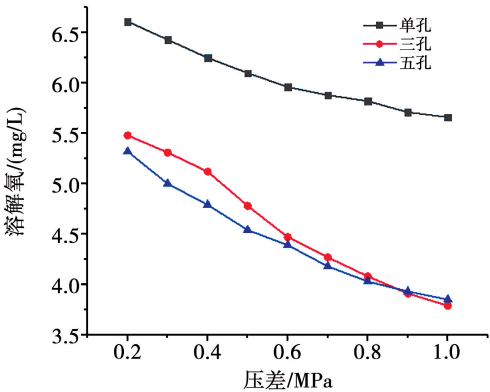


图 7 溶解氧随压差的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of dissolved oxygen with differential pressure

2.6 孔板孔型对空化效应的影响

实验用水的初始温度为 15℃,孔板厚度为 8 mm,以 0.1 MPa 等差值递增,在 0.2 MPa ~ 1 MPa 压差范围内,分别对三角形、正方形、圆形孔的三孔孔板进行九次空化实验,空化时间为 60 min,每个水

样等量分成三份进行测量,取其电导率、溶解氧 10 次实验的平均值并记录实验数据,整理得到水的电导率随压差的变化规律如图 8 所示。

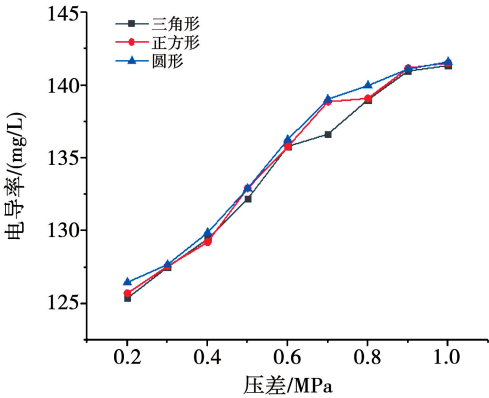


图 8 电导率随压差的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of conductivity with differential pressure

由图 8 可知,电导率随着压差升高总体呈上升趋势,压差在 0.8 MPa ~ 1 MPa 时,增幅逐渐变缓,这说明随着压差的升高,孔板的空化强度逐渐变强,且空化强度不会随着压差无限升高;在相同压差下,三种孔型的孔板电导率值比较接近,说明开孔率相近的情况下,孔型对孔板空化强度的影响较小,但可以看出细微差别,圆形的电导率 > 正方形的电导率 > 三角形的电导率,表明圆形孔板空化效果最好。分析原因:三角形孔板和正方形孔板都具有棱角,在棱角处缝隙小,流速快,根据能量守恒定律,流体动能越大,压力势能越小,当小于大气饱和蒸气压时,更容易发生空化,而且产生空化较强,但只有棱角处有空化现象,而圆形孔板一圈都可以发生空化,整体而言,圆形孔板空化效果较好。

水的溶解氧随压差的变化规律如图 9 所示。由图可知,不同孔形状的溶解氧随压差总体呈降低趋势,这是因为随着压差不断升高,空化强度逐渐变强,空泡溃灭释放的高温高压促使 O_2 裂解成为 $\cdot O$ 参与反应,化学效应的正反应逐渐变强, O_2 的消耗量逐渐增加,使水中的溶解氧含量逐渐降低压差在 0.2 MPa ~ 1 MPa 下,不同孔型的溶解氧数值较为接近,可以看出细小的差别,溶解氧的数值整体表现为:三角形 > 正方形 > 圆形,表明孔形状对孔板空化强度的影响微弱,整体圆形孔板效果略好一些,方形孔板其次,三角形孔板较差一些。

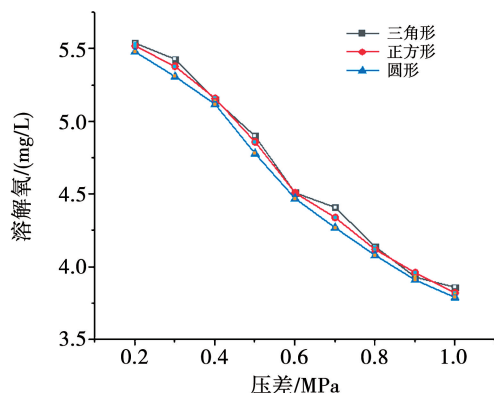


图 9 溶解氧随压差的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of dissolved oxygen with differential pressure

3 结 论

在以五孔孔板为参考,在 0.6 MPa 压差下,通过三因素三水平正交试验,得到了操作参数的最佳水平方案:空化时间 60 min、水介质初始温度 15℃、水样放置时间 10 min,后续实验均在该操作参数下进行。

1)随着入口压力的增加,流场的空化强度逐渐变强,溶液的电导率逐渐变大,溶解氧逐渐降低。

2)在改变孔板厚度条件下,压差 0.2 MPa ~ 0.9 MPa 内,孔板厚度 8 mm 孔板的电导率达到 140.54 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳,压差在 0.9 MPa ~ 1 MPa 内,10 mm 孔板的电导率达到 142.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳;

3)在改变孔板孔数条件下,压差在 0.2 MPa ~ 0.6 MPa 内,五孔孔板的电导率达到 136.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳,压差在 0.6 MPa ~ 1 MPa 内,三孔孔板的电导率达到 141.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空化效果最佳;

4)在改变孔板孔型条件下,压差在 0.2 MPa ~ 1 MPa 内,孔型对孔板空化强度的影响微弱,整体圆形空化效果最好,方形次之,三角形最差。

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] ILGYUL, HAN J P. The Effects of Waste-activated Sludge Pretreatment Using Hydrodynamic Cavitation for Methane Production [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2013, 20(6): 1450.
- [5] 李本高, 马欣, 龙军. 工业水处理技术. 第十一册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 12.
- [6] SUN X, JONG J P, HYUN S K, et al. Experimental Investigation of the Thermal and Disinfection Performances of a Novel Hydrodynamic Cavitation Reactor [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2018, 49(8): 101.
- [7] SUN X, XUAN X, L J, et al. A Novel Continuous Hydrodynamic Cavitation Technology for the Inactivation of Pathogens in Milk [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 71(10): 53.
- [8] HYUNSOO K, SUN X, BONCHAN K, et al. Experimental Investigation of Sludge Treatment Using a Rotor-Stator Type Hydrodynamic Cavitation Reactor and an Ultrasonic Bath [J]. Processes, 2019, 7(11): 790.
- [9] PARTHASARATHY S, YING T S, MANICKAM S. Generation and Optimization of Palm Oil-Based Oil-in-Water (O/W) Submicron-Emulsions and Encapsulation of Curcumin Using a Liquid Whistle Hydrodynamic Cavitation Reactor (LWHCR) [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(4): 11829.
- [10] HAN X X, WANG Y X. Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Novel Concentric Tube Heat Pipe Heat Exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 1338.
- [11] JAYESHKUMAR M, SUMEDH D, ANIRUDDHA P. Large Scale Microbial Cell Disruption Using Hydrodynamic Cavitation: Energy Saving Options [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 143: 151.
- [12] 姜冬冬. 超声波强化技术处理船舶生活污水的效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [13] 单礼伟. 破解剩余污泥的堵塞空化技术的实验研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [14] 丁雷, 王佳平, 赵一先, 等. 纯水体系超声空化产额

研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(3): 34.

DING Lei, WANG Jiaping, ZHAO Yixian, et al. Study on Ultrasonic Cavitation Yield of Pure Water System[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(3): 34.

[15] 黄永春, 吴修超, 任仙娥, 等. 水力空化对原糖溶液表面张力的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 16.

HUANG Yongchun, WU Xiuchao, REN Xiane, et al. Effect of Hydraulic Cavitation on Surface Tension of Raw Sugar Solution [J]. Food and Machinery, 2012, 28(6): 16.

[16] AMIRLKHLAQ, DAVID R, BROWN, et al. Mechanisms of Catalytic Ozonation on Alumina and Zeolites in Water: Formation of Hydroxyl Radicals[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, (3): 123.

[17] 董志勇, 张邵辉, 杨杰, 等. 多孔板与文丘里组合式空化灭活致病菌研究[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(1): 24.

DONG Zhiyong, ZHANG Shaohui, YANG Jie, et al. Study on the Inactivation of Bacteria by Combined Cavitation of Porous Plate and Venturi[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47(1): 24.

[18] 杨思静, 晋日亚, 乔伊娜, 等. 文丘里管结构参数对水力空化降解罗丹明 B 染料废水的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 72.

YANG Sijing, JIN Riya, QIAO Yina, et al. Effect of Venturi Tube Structure Parameters on the Degradation of Rhodamine B Dye Wastewater by Hydraulic Cavitation [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2017, 38(1): 72.

[19] 赵文倩. 方形孔口多孔板水力空化杀灭水中病原微生物的实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.

[20] 吴永生, 方可人. 热工测量及仪表[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

(编辑:温泽宇)