

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.02.010

旋流式壅塞空化器处理苯酚溶液研究

张风华, 陈 谷, 贺照云, 王 勇

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 壅塞空化是一种新型的水力空化技术, 在壅塞空化器喷嘴内加入旋流芯即成为旋流式壅塞空化器。在不同背压和旋流芯长度下, 利用 CFD 软件对旋流式壅塞空化器内部流场进行了数值仿真, 并对不同初始浓度的苯酚溶液采用高效液相色谱仪检测其处理前后的质量浓度变化。计算结果表明, 旋流式壅塞空化器内部产生的涡环对壅塞空化具有促进作用, 并存在最佳背压和旋流芯长度。模拟污水处理试验结果表明: 当背压为 200 kPa, 旋流芯长度为 3/4 倍导程, 苯酚溶液的初始质量浓度为 5 mg/L 时, 旋流式壅塞空化器对苯酚溶液的去除效果最佳。

关键词: 壅塞空化; 苯酚; 旋流芯; 背压

中图分类号: TP69; X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0055-09

Study on the Treatment of Phenol Solution by Swirling Choking Cavitators

ZHANG Fenghua, CHEN Gu, HE Zhaoyun, WANG Yong

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

Abstract: Choking cavitation is a recent technology of hydrodynamic cavitation. A swirling choking cavitator can be formed by adding a swirling core into the nozzle of the choking cavitator. With different back pressures and swirling core lengths, a numerical simulation can be achieved of the internal flow field in the cyclone choking cavitator by using CFD software. The change of mass concentration of the phenol solution with different initial concentration can be treated with a high performance liquid chromatograph. The calculation results show that the vortex ring generated in the internal swirling choking cavitator helps to promote the choking cavitation, with an optimal back pressure and swirling core length. The simulation test results of wastewater treatment show that: when the pressure is 200 kPa, the swirling core length will be of 3/4 lead; when the initial concentration of phenol solution is 5 mg/L, an optimal phenol removal efficiency can be achieved by the swirling choking cavitator.

Keywords: choking cavitation; degradation phenol; swirling core; back pressure

0 引言

含酚类废水的处理技术可以分为物化处理技术、生化处理技术、高级氧化技术等^[1]。较多的科研工作者研究了这些技术对酚类的去除效果, 如张会平等^[2]研究了活性炭吸附苯酚的平衡关系, 结果表明吸附法

能够有效去除废水中的苯酚; 邵风琴等^[3]在废水中添加络氨酸酶以去除苯酚, 得知该方法对苯酚的去除率高达 100%; K. Fajerwerg 等^[4]在常压及 900 ℃ 温度条件下, 用湿式过氧化物氧化法降解废水中的酚, 结果表明该方法对酚的转化率达 90% 以上。以上方法均对苯酚有较高的去除率, 但是这些方法的处理成

收稿日期: 2017-10-20

基金项目: 湖南省自然科学株洲联合基金资助项目 (2015JJ5014)

作者简介: 张风华 (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

本较高、周期较长。

水力空化作为一种水处理方法,因其空化设备结构较为简单、处理能力较强、易于实现工业化等优点,近年来被业界认为是一项极具潜力的新型水处理技术。刘峰等^[5]用射流空化法处理深度乳化的、高浓度含油废水,结果表明,经3次处理后油滴的去除率大于95%,且多次处理后的废水达到了二级排放标准;邓松圣等^[6]用射流空化装置降解苯酚,循环800 min后苯酚的去除率达70.91%。A. G. Chakinala等^[7]利用“水力空化-芬顿”技术处理酚类化合物和生活中的印染废水,结果表明水力空化-芬顿协同处理技术能较好地处理生物难降解的污染废水;王金刚等^[8]采用涡流空化装置降解水中的罗丹明B,结果表明,在设定的条件下,罗丹明B的降解率达40%;本课题组开发的壅塞空化器解决了空泡产生所需的低压和溃灭所需的高压这一矛盾,从而大幅度提高了空泡的有效溃灭^[9-11]。

本研究针对加入旋流芯后的壅塞空化器,利用Fluent软件计算在不同背压和旋流芯长度下的空化器内部流场特征,探讨旋流芯对壅塞空化器内部流场及空化的影响规律;同时,采用高效液相色谱仪检测在不同背压、旋流芯长度、苯酚溶液初始浓度、循环次数等条件下苯酚溶液处理前后的质量浓度,并计算苯酚的去除率,探讨以上条件对旋流式壅塞空化器处理苯酚溶液效果的影响规律。

1 数值分析

1.1 网格划分

图1所示为旋流式壅塞空化器的结构示意图。图中, L_1 为旋流芯长度,试验中分别取 L_1 为1/4, 2/4, 3/4, 4/4倍导程,且导程为20 mm; d 为旋流芯直径,取6.5 mm; D 为壅塞管直径,取10 mm, L_2 为壅塞管长度,且壅塞管长径比 $L_2/D=5$ 。

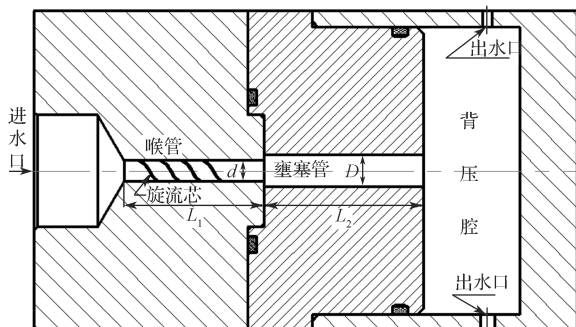


图1 旋流式壅塞空化器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the swirling choking cavitators

旋流式壅塞空化器是一种改进的壅塞空化器。

如图1所示,在喷嘴内加入旋流芯,流体进入喷嘴后沿着旋流芯射入壅塞管内而形成旋转射流,此旋转射流加剧了壅塞管内射流与伴随流的能量交换,从而诱发生更多的空泡。在一定条件下,随着气液两相流往壅塞管下游流动,在壅塞管下游某处会出现壅塞现象。当空泡穿过此壅塞截面时迅速溃灭,称之为壅塞空化现象。为简化计算,本文只模拟旋流芯和壅塞管段的流场,并对流场作如下假设:空化器内部流场为稳定的紊流流动,管内液体不可压缩,气体为理想气体,不计重力、蒸汽压力、相间速度滑移、气液黏度、温度的影响以及气核壁热传递与质量传递。在此基础上建立计算坐标系,并进行三维实体网格划分。旋流式壅塞空化器的网格模型如图2所示。



图2 旋流式壅塞空化器的网格模型

Fig. 2 Grid model of swirling choking cavitators

1.2 算法与边界条件

在利用Fluent计算时,气液两相流采用mixture混合模型,且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 $K-\epsilon$ 湍流模型,各项计算以残差低于 10^{-4} ,并且进、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 、 ϵ 方程的求解采用一阶迎风格式。

边界条件设置如下:以旋流芯起始点(参考原点)为入水口,壅塞管末端为出水口,采用速度入口和压力出口。入口流速设置为40 m/s固定不变;背压(壅塞管出口压力)设置为0.1~0.3 MPa;气体体积分数为0.01%;入口湍流强度 I 按式(1)计算,得 $I=0.037$ 。

$$I=0.16Re^{-1/8}, Re=vd\rho/\eta.$$

式中: Re 为雷诺数;

v 为旋流芯喷嘴出口射流平均速度, m/s;

d 为旋流芯喷嘴的当量直径, m;

ρ 为水的密度, kg/m^3 ;

η 为水的动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

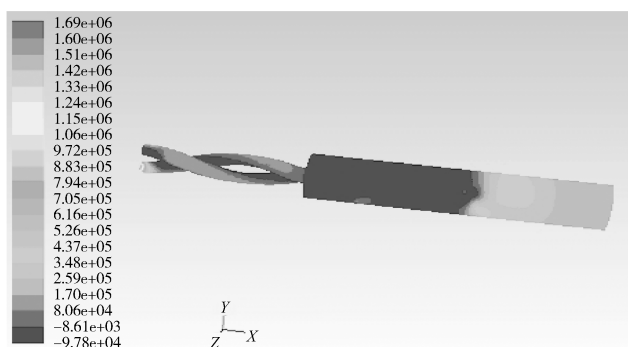
计算压力均采用相对压力。

1.3 仿真结果分析

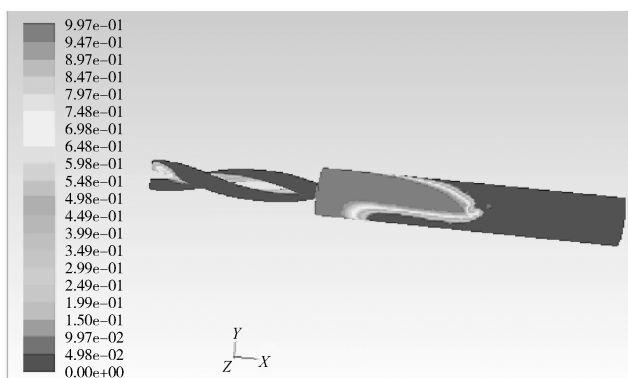
1.3.1 壅塞空化现象

图3~7是入口流速为40 m/s,旋流芯长度为3/4

倍程, 背压为 200 kPa 时的仿真结果。



a) 静压力云图



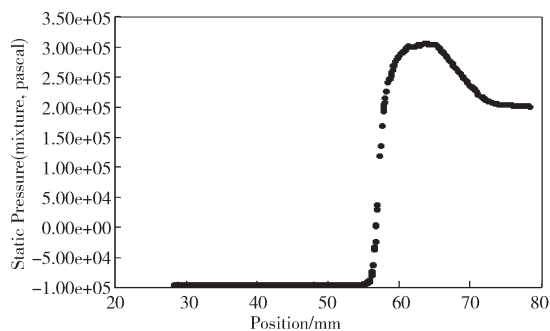
b) 空隙率云图

图3 静压力和空隙率云图

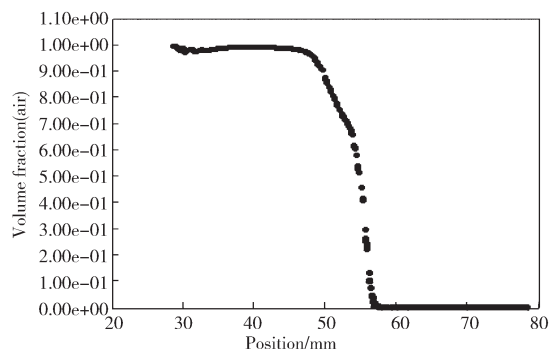
Fig. 3 Nephogram of static pressure and voidage

从图3所示的静压力云图和空隙率云图可以得知, 壅塞管内部压力和空隙率明显地被分为两个部分, 靠近壅塞管入口(上游)一侧的压力较低、空隙率相对较高; 而靠近壅塞管出口(下游)一侧的压力较高、空隙率相对较低。压力和空隙率的分界面称为壅塞截面, 在其左侧(上游)压力达最小值, 空隙率达最大值; 而在其右侧(下游)压力达最大值, 空隙率达最小值。

由图4和图5可以得知, 当 $X=57\text{ mm}$ 左右时, 静压力和空隙率曲线斜率的绝对值达最大值, 即静压力随 X 轴坐标的变化率(压力恢复梯度)、空隙率随 X 轴坐标的变化率(溃灭率)在 $X=57\text{ mm}$ 处几乎均达最大值。



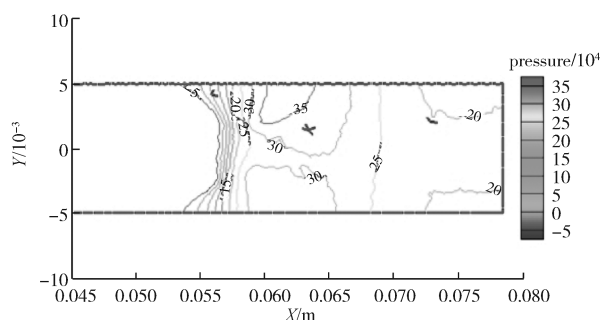
a) 静压力



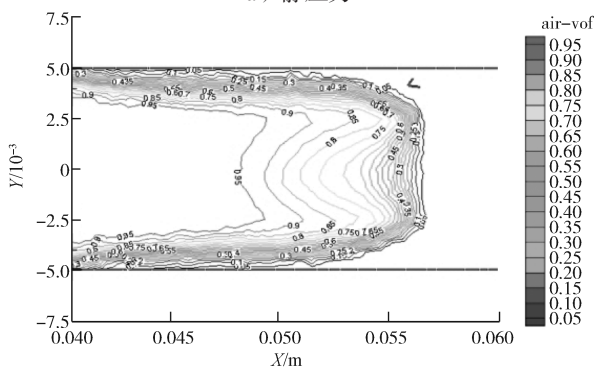
b) 空隙率

图4 沿 X 轴的静压力和空隙率变化曲线图

Fig. 4 Curve graph of static pressure and voidage along X -axis



a) 静压力

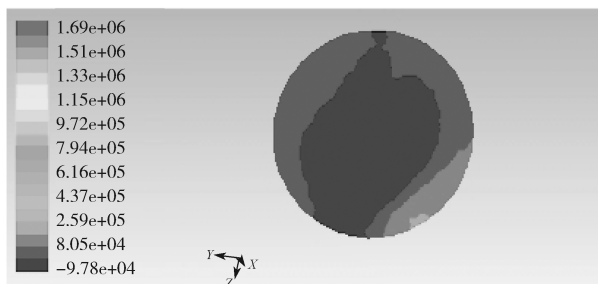


b) 空隙率

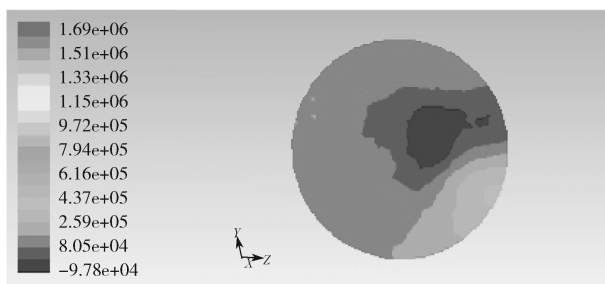
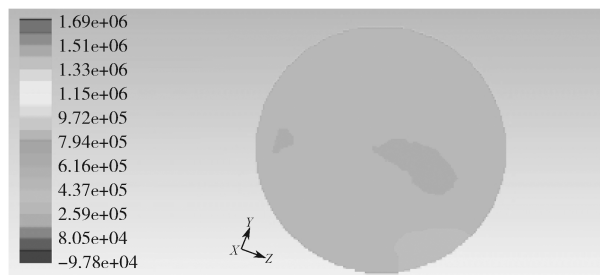
图5 XOY 平面静压力和空隙率分布局部放大图

Fig. 5 Partial enlarged drawing of the distribution of XOY plane static pressure and void fraction

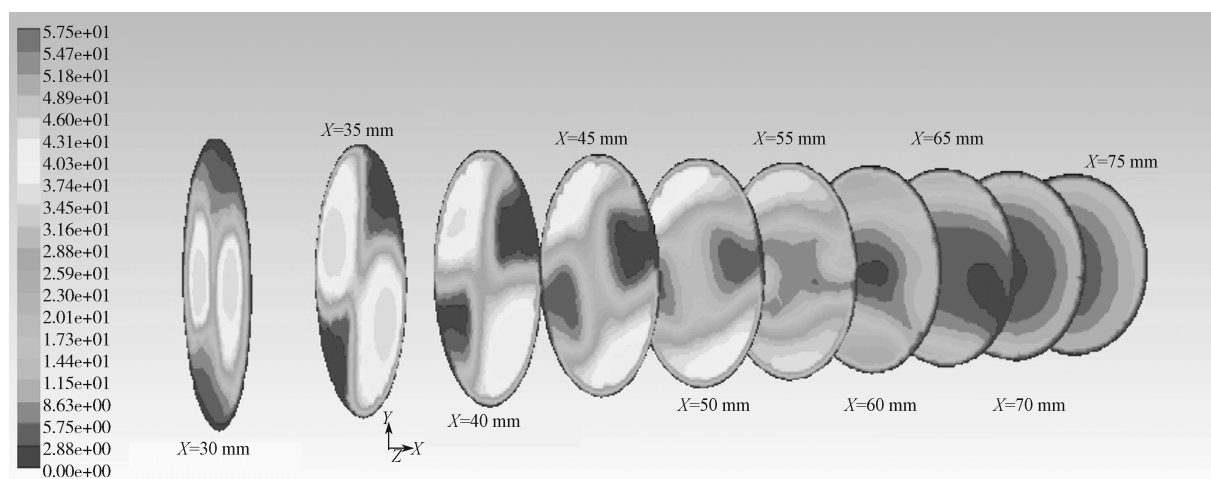
当水流经过具有旋流芯的喷嘴射入壅塞管时, 形成的旋转射流在壅塞管内加剧了主流与伴随流的能量交换, 产生了两股涡环, 见图6和图7。



a) $X=56\text{ mm}$

b) $X=57$ mmc) $X=58$ mmd) $X=59$ mm图6 不同 X 取值下平行于 YOZ 面的静压力分布云图Fig. 6 Nephogram of the distribution of the static pressure parallel to YOZ surface under different X values

由于射流主流和涡环的作用, 壅塞管内(壅塞截面上游)形成了低压区, 有利于生成大量空泡。当携带大量空泡的主流(气液两相流)通过壅塞截面后, 由于受到大压力恢复梯度的作用, 空泡几乎溃灭。可见, 在该数值模拟条件下, 壅塞管内出现了明显的壅塞空化现象。

图7 平行于 YOZ 各截面上的速度变化图Fig. 7 Velocity variation graph parallel to each section of YOZ

综合图4和图5, 可以判断在设定条件下壅塞截面位置约在 $X=57$ mm处。根据图5估算出壅塞截面处最大压力恢复梯度达 1.25×10^8 Pa/m。如图5所示, 取压力等值线为300 000 Pa和50 000 Pa的两等值曲线, 计算两者压力差与两曲线最小距离(约2 mm)之比作为最大压力梯度的估算值。在如此高的压力恢复梯度下, 空泡尺寸迅速缩小而溃灭, 并释放出能量, 形成特殊的物化环境, 这对水力空化处理水中有毒有机物是有利的。

由图6和图7可知, 在壅塞管内部流场中, 明显出现了涡环; 流体越靠近涡环中心, 速度越大、压力越低; 在 $X=57$ mm左右, 涡环基本消失。由于旋流芯的加入, 使得进入壅塞管的射流除具有 X 轴向速度外还具有一定的旋度, 在壅塞管内产生了两

股大的涡环, 涡环越靠近壅塞截面越不明显, 在壅塞截面附近基本消失。涡环的存在: 一方面使壅塞管上游的压力进一步降低, 这有利于上游产生的空泡的进一步发展, 因此上游空隙率增大, 达到空隙率的最大值(如图3b所示); 另一方面, 它使得壅塞截面的形态发生了改变, 由一定幅度的曲面^[12]变为了不规则的近似螺旋曲面, 增大了壅塞截面的面积, 空泡溃灭的面积增大, 空泡溃灭发生在更大水体中。如图5所示, 空隙率等值线关于 X 轴成侧卧着的“M”字样对称, 这进一步说明空泡是在不规则的近似螺旋状壅塞截面上发生迅速、激烈的溃灭, 壅塞截面附近空隙率变化很快, 等值线分布最为密集。加入旋流芯的壅塞空化器将更有利于处理水中的有毒有机物。

1.3.2 背压对壅塞空化的影响

图8是当水流入速度为40 m/s、旋流芯长度为3/4 导程、背压分别为100, 150, 200, 300 kPa时, 壅塞空化器X轴上的静压力分布曲线图。

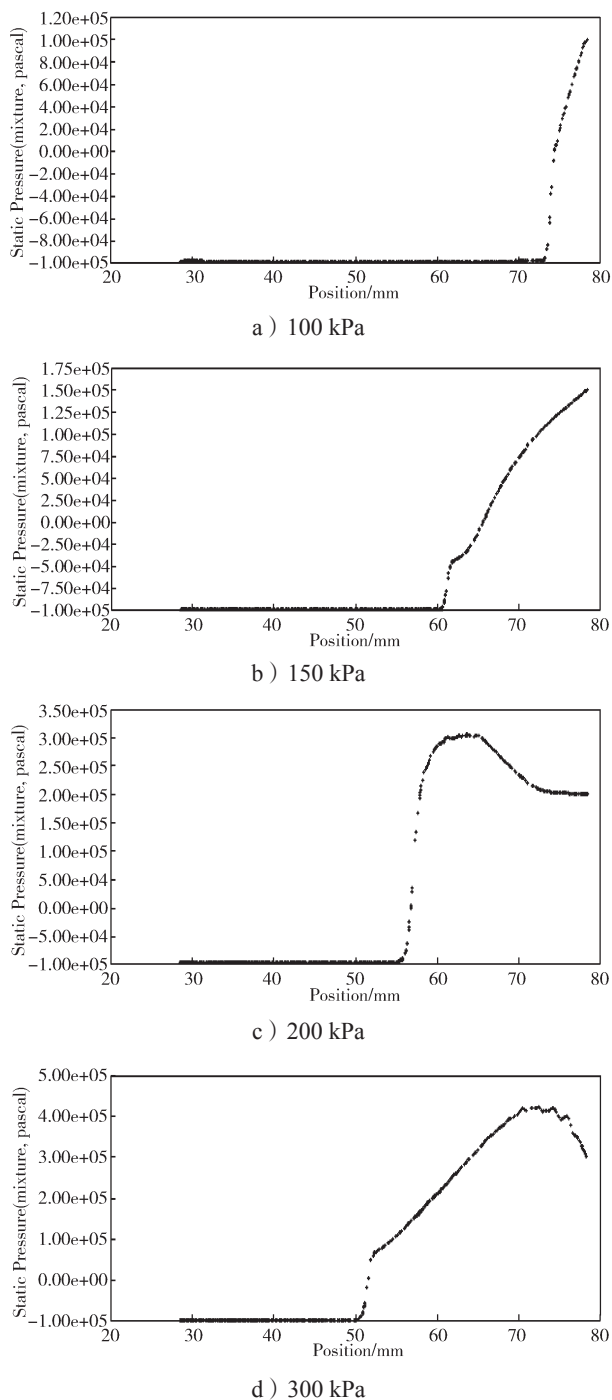


图8 不同背压下X轴上静压力分布曲线

Fig. 8 Curve digraph of the distribution of the static pressure on X axis under different back pressures

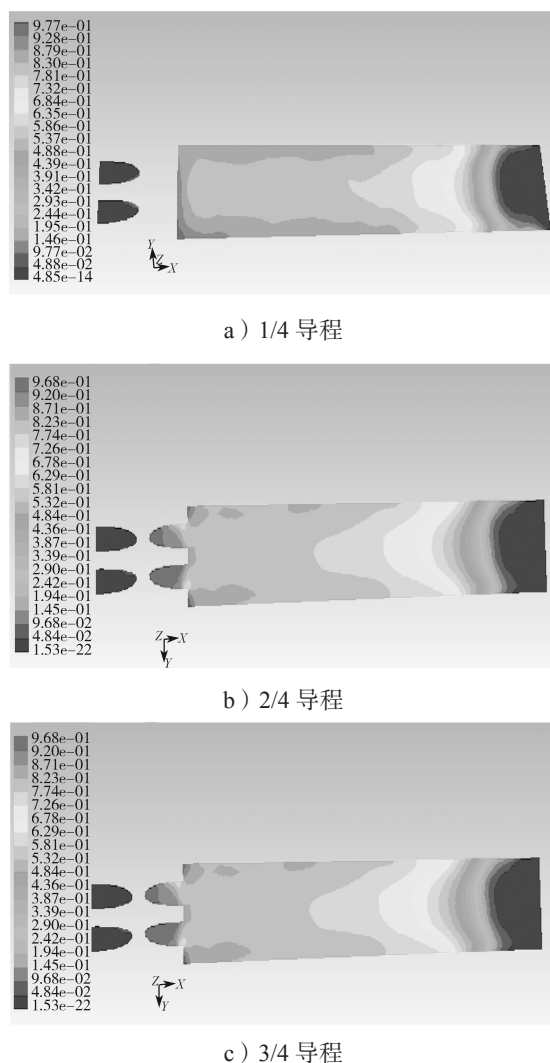
由图8可知, 随着背压的增大, 壅塞截面向壅塞管上游移动, 壅塞截面由100 kPa时位于 $X=76$ mm处移动到了300 kPa时位于 $X=54$ mm处。当下游的背压发生变化时, 壅塞截面上游压力的最小值基本不

变, 但是壅塞截面处的压力恢复梯度不同。当背压为200 kPa时, 压力变化曲线的斜率最大, 此时在壅塞截面附近压力恢复梯度最大(如图8c所示)。因为压力梯度越大越有利于空泡的有效溃灭, 所以此时为最佳背压。

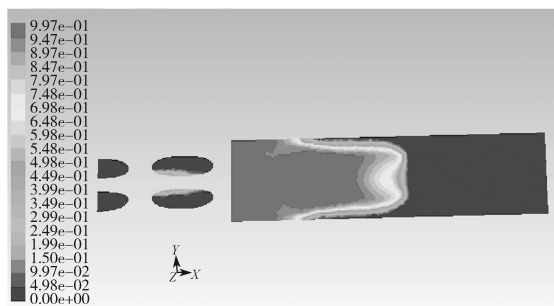
根据气液两相临界流理论, 当管道内形成壅塞时, 在一定的压力范围内, 壅塞截面下游压力的变化不会影响壅塞截面上游的压力^[13]。这样, 在壅塞管内可以建立由壅塞截面分开的特殊流场: 其上游是有利于空泡生长的低压区, 下游是有利于空泡溃灭的高压区。这一特殊流场的建立, 很好地解决了空泡生长和溃灭需要不同压力场的矛盾。在一定范围内, 通过调整背压(即壅塞截面下游压力), 可以寻找到更有利于空泡溃灭的条件, 即壅塞截面处更大的压力恢复梯度, 这对空化处理有毒有机物是很有利的。

1.3.3 旋流芯长度对壅塞空化的影响

入口速度为40 m/s, 背压为200 kPa时, 4种旋流芯长度在XOY平面的空腔率云图如图9所示。



c) 3/4 导程



d) 4/4 导程

图9 各导程下 XOY 平面空隙率云图

Fig. 9 Nephogram of the void fraction on XOY plane under different leads

对比图9中各不同导程下 XOY 平面空隙率云图可以得知, 1/4 倍和 2/4 倍导程旋流芯所形成的堵塞截面位于堵塞管下游出口处, 堵塞截面上游空隙率较低, 导致堵塞截面溃灭的空泡数量、尺寸均较小, 这对空泡有效溃灭不利; 3/4 倍和 4/4 倍导程时, 上游的空隙率较高, 上游空泡得到充分发展(产生、长大), 经过堵塞截面后, 空隙率接近零, 这说明空泡几乎得到了有效溃灭, 此时的空化效果较好。仔细观察各导程下的空隙率云图, 可以看到 3/4 导程的堵塞截面较 4/4 导程的更薄, 截面形状为不规则的曲面。由于堵塞截面较薄, 所以压力恢复梯度较大, 空泡可以迅速而剧烈地溃灭; 又由于截面形状不规则, 截面的面积较大, 这对空泡在更大水体中溃灭有利。因此, 3/4 导程旋流芯长度的堵塞空化器的空化效果最佳。当入口速度相同时, 水从具有旋流芯的喷嘴射出时射流的旋度会随着旋流芯的增加先增大后减小。当旋流芯的长度增加时(图9a、b、c), 流体在旋流芯的螺旋通道内流动的旋度增加, 旋流芯越长旋转越充分, 旋度增加, 切向速度增加, 涡环更加明显, 越有利于上游诱发产生和发展更多更大尺寸的空泡, 导致空隙率增加。但是当旋流芯长度超过一定值后, 由于在旋流芯的螺旋通道内流体会损耗更多的能量, 切向速度减小, 导致旋度降低, 空隙率反而减小, 如图9d所示。

2 处理苯酚溶液试验

2.1 试验装置

苯酚去除试验的循环系统装置如图10所示, 它由旋涡泵、压力表、流量计、空化器、水槽、软管、温度计和蛇形管等组成。

苯酚去除试验过程中, 水槽中待处理的苯酚溶液经过旋涡泵加压, 通过软管被输送到空化器, 经空化器处理后的苯酚溶液再回到水槽。试验时的压力值由

压力表读取, 流量由流量计读取, 处理溶液的温度由温度计观测, 冷却水经蛇形管对处理的苯酚溶液进行冷却, 使试验过程中苯酚溶液的温度控制在 38 ℃ 以内。空化器为本课题组自主研发、设计、制作的旋流式堵塞空化器, 旋涡泵的类型为 1W-2.5-12 (上海博洋水泵公司生产, 功率为 3 kW, 扬程为 120 m, 转速为 2 900 r/min, 材质为 304 不锈钢), 涡旋流量计型号为 LWGYD-1 (杭州逸控科技有限公司生产, 测量范围为 0.4~8.0 m³/h, 公称压为 6.3 MPa, 精度等级为 0.5%), 水槽尺寸为 Φ350 mm × 340 mm, 体积为 20 L。

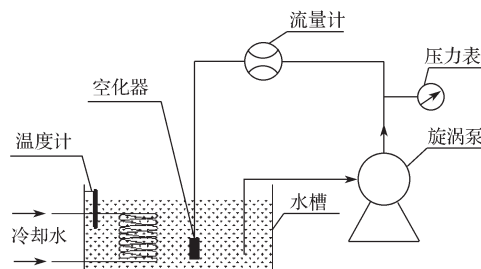


图10 苯酚去除试验循环系统示意图

Fig. 10 A schematic diagram of the cyclic system in phenol removal tests

2.2 去除苯酚试验

取苯酚溶液作为模拟污水, 试验过程中分别改变旋流芯长度、背压大小和苯酚溶液初始浓度。当流过空化器的计算体积等于水槽内处理溶液体积(本试验中设置为 15 L)时即完成 1 次循环。周期取样, 试验时每隔 50 次循环取样 1 次。用高效液相色谱仪 STI-501Plus (赛智科技(杭州)有限公司生产, 最小检测限为 1×10^{-9} g/mL, 梯度误差为 $\pm 1\%$) 检测处理前后的苯酚溶液质量浓度。

苯酚去除率 D_e 按如下公式计算:

$$D_e = \frac{C_0 - C_N}{C_0} \times 100\%.$$

式中: C_0 为苯酚初始质量浓度, mg/L;

C_N 为循环 N 次后的苯酚质量浓度, mg/L。

取样周期 T 按以下公式计算:

$$T = \frac{VN}{\frac{Q \times 1000}{60}} = \frac{6VN}{Q \times 100}.$$

式中: V 为初始苯酚溶液体积, L;

Q 为流量, m³/h。

2.3 试验结果分析

2.3.1 背压对苯酚去除率的影响

初始苯酚溶液质量浓度为 5 mg/L 的模拟污水, 在空化系统中循环 200 次, 所得到的背压 P_1 对苯酚

去除率影响曲线如图 11 所示。

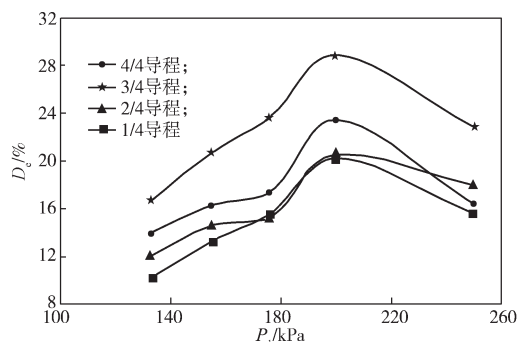


图 11 背压对苯酚去除率的影响曲线

Fig. 11 Influence curves of the back pressure on the removal rate of phenol

由图 11 可知, 不同旋流芯长度下的苯酚去除率随背压的变化规律基本相同, 即苯酚的去除率随背压的增加先增大后减小, 当背压为 200 kPa 时, 苯酚的去除率均达最大值。

利用旋流式壅塞空化器除去苯酚的机理主要是自由基的氧化, 苯酚的去除率主要取决于空化过程中羟自由基的产量。而羟自由基·OH 是伴随在空泡溃灭瞬间, H—OH 吸收空泡溃灭瞬间释放的能量而生成的。因此在空化过程中, 空泡溃灭的量和空泡溃灭的质——空化强度的大小, 将直接影响空化过程中羟自由基的产生量。即空化强度越高, 羟自由基产生量越高, 苯酚的去除率也越高, 反之亦然。在壅塞空化现象中, 壅塞截面上游诱导空泡的产生、发展, 上游形成的空泡经过壅塞截面后几乎完全溃灭, 所以上游诱导产生的空泡量决定了参与溃灭空泡量的上限值; 与此同时, 上游产生的空泡在经过壅塞截面时, 由于压力的急剧升高, 空泡在压力的作用下体积迅速收缩、溃灭, 此时压力恢复梯度越大, 空泡溃灭得越迅速、越激烈、越彻底, 释放的能量也越大, 空泡溃灭的质越好。苯酚的去除率受到了旋流式壅塞空化器上游诱导产生的空泡量和空泡经过壅塞截面时在压力恢复梯度的作用下溃灭的质的影响。因此, 空化强度得到提高, 羟自由基的产生量增加, 苯酚的去除率增大; 试验条件下的最佳处理背压为 200 kPa, 这与仿真结果一致。

2.3.2 旋流芯长度对苯酚去除率的影响

试验时选择了 1/4、2/4、3/4、4/4 倍导程的 4 种不同长度旋流芯进行对比。苯酚初始质量浓度为 5 mg/L 的模拟污水在 200 kPa 背压下得到的各旋流芯苯酚去除率变化曲线如图 12 所示。由图 12 可以得知, 在同一旋流芯长度下, 随着循环次数的增加, 苯酚的去除率增加, 且在 200 kPa 背压下, 3/4 导程旋流芯的去

除率最高。

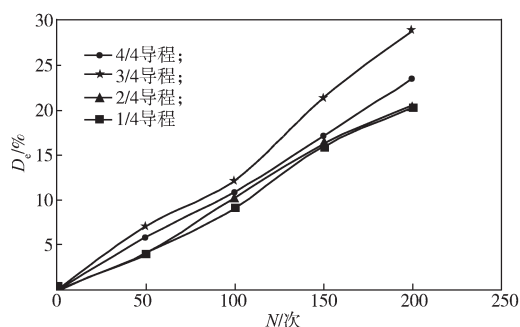


图 12 旋流芯长度对苯酚去除率的影响曲线

Fig. 12 Influence curves of the swirling core on the removal rate of phenol

如同 1.3.3 的分析, 旋流芯长度对旋流式壅塞空化器的空化效果有较大的影响, 旋流芯长度对苯酚的去除率也有影响。当在一定范围内增加旋流芯的长度时, 苯酚的去除率增加; 当长度超出这一范围时, 苯酚的去除率又开始降低。所设定试验条件下的最佳旋流芯长度为 3/4 倍导程, 与仿真结果相同。1 倍导程旋流芯长度的苯酚去除率高于 1/4 倍和 2/4 倍导程时的去除率。

2.3.3 苯酚溶液初始浓度对苯酚去除率的影响

当旋流芯长度为 3/4 倍导程时, 不同初始苯酚质量浓度条件下, 背压对苯酚去除率的变化曲线如图 13 所示。而当旋流芯长度为 3/4 倍导程、背压为 200 kPa 时, 不同初始苯酚浓度条件下的苯酚去除量变化曲线如 14 所示。

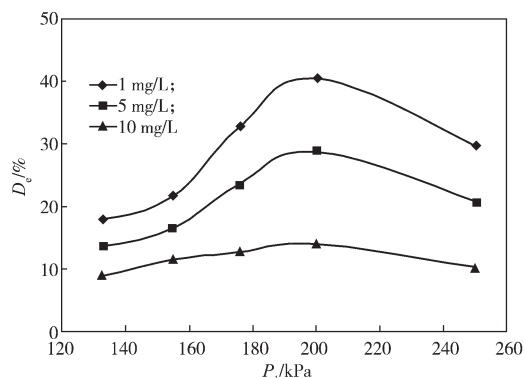


图 13 不同初始苯酚浓度下苯酚去除率变化曲线

Fig. 13 Change curves of phenol removal rate under different initial phenol concentration

从图 13 可以得知, 对不同的苯酚溶液初始浓度, 随着背压增大, 苯酚的去除率先增加后减小; 当背压为 200 kPa 时, 苯酚的去除率达峰值。由 2.3.1 中的分析可知, 200 kPa 是试验最佳背压, 此时空化强度最高, 苯酚的去除率最大。

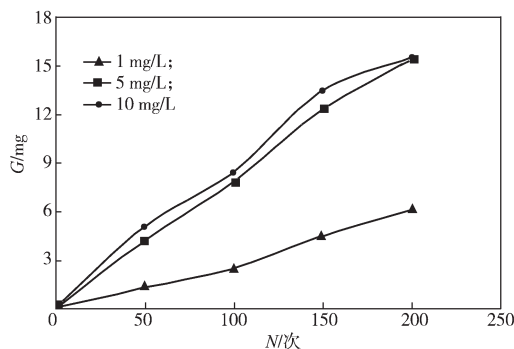


图 14 不同初始浓度下的苯酚去除量变化曲线

Fig. 14 Change curves of the change of phenol removal rate under different initial concentration

值得注意的是，苯酚溶液初始浓度越小，苯酚去除率越大（见图 13），苯酚溶液初始浓度越大，苯酚去除量越大（见图 14）。可能的原因是：当空化条件一定时，空化产生的自由基数量是一定的，即溶液中的自由基浓度是一定的，自由基能氧化的苯酚量也是一定的。苯酚浓度较低时，溶液中被氧化的苯酚分子数占总苯酚分子数的比例更大，表现为苯酚去除率高，但自由基与苯酚溶液发生反应的几率低，去除量低。苯酚浓度较高时，溶液中被氧化的苯酚分子数占总苯酚分子数的比例较小，表现为苯酚去除率低，但自由基与苯酚溶液发生反应的几率高，去除量高。图 14 中，出现了 5 mg/L 和 10 mg/L 的去除量曲线基本重合，且都大大高于 1 mg/L 的去除量。这说明初始浓度对去除量有影响，但当初始苯酚质量浓度超过 5 mg/L 时，其去除量增加并不明显。因为相同背压、旋流芯长度条件下，空化强度相同，空化产生的羟自由基总量不变。当初始浓度过高时，受一定的羟自由基量的限制，此时过剩的苯酚分子不能捕捉到更多空化产生的羟自由基，去除量基本保持不变。

2.3.4 循环次数对苯酚去除率的影响

旋流芯长度为 3/4 导程、苯酚溶液初始浓度为 5 mg/L 条件下，循环次数与苯酚去除率之间的关系曲线如图 15 所示。

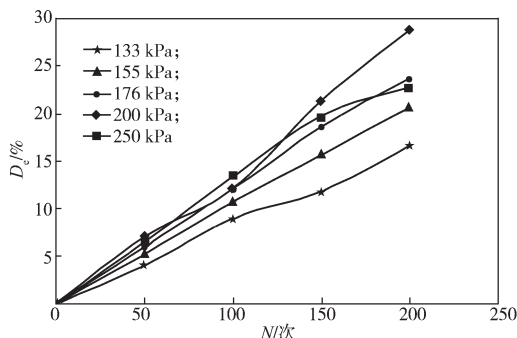


图 15 循环次数对苯酚去除率的影响曲线

Fig. 15 Change curves of the cyclic frequency on the removal rate of phenol

由图 15 可知，随着循环次数的增加，苯酚去除率增加，背压为 200 kPa 时苯酚的去除率最高。曲线具有近似线性特征，说明此时的空化是比较稳定的。随着循环次数的增加，空泡连续高强度地溃灭使得溃灭空泡壁面附近局部区域产生的羟自由基不断被该区域苯酚分子捕捉，苯酚分子逐渐减少，苯酚去除率不断增加。当背压为 200 kPa 时，空泡溃灭强度最高，故产生的羟自由基的量最高，去除率达最大值。旋流式壅塞空化器产生空化时形成了一个稳定的壅塞截面，使得上游产生的空泡量及壅塞管内发生的空泡溃灭的质都很稳定，因此空泡溃灭时产生的羟自由基的量也很稳定，故去除率随循环次数的增加而增大，呈现出近似的线性关系。

3 结论

通过以上数值模拟和模拟污水处理试验研究，可以得出如下结论：

1) 数值模拟和模拟污水处理试验结果都表明旋流式壅塞空化器产生了明显的壅塞空化现象，能够有效去除溶液中的苯酚。

2) 旋流式壅塞空化器在壅塞管内产生了两股螺旋对称的涡环，促进了壅塞截面上游空泡的产生和长大，同时涡环还改变了壅塞截面形状，增大了空泡溃灭区域的面积，增加了空化过程中产生的羟自由基与苯酚反应的概率。

3) 旋流式壅塞空化器存在最佳空化参数组合。已有试验条件下的最佳参数组合为背压 200 kPa、旋流芯长度为 3/4 倍导程和苯酚溶液初始质量浓度为 5 mg/L。

参考文献：

- [1] 许新芳, 陈亚鹏, 霍 鹏, 等. 新生态 MnO_2 对废水中苯酚的吸附研究 [J]. 河北省科学院学报, 2006, 23(2): 73-75.
XU Xinfang, CHEN Yapeng, HUO Peng, et al. Studies on Adsorption of Phenol by the Fresh MnO_2 [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2006, 23(2): 73-75.
- [2] 张会平, 钟 辉, 叶李艺. 苯酚在活性炭上的吸附与脱附研究 [J]. 化工科技, 1999, 7(4): 35-38.
ZHANG Huiping, ZHANG Hui, YE Liyi. Adsorption and Desorption of Phenol on Activated Carbon [J]. Science and Technology in Chemical Industry, 1999, 7(4): 35-38.
- [3] 邵凤琴, 韩庆祥. 酶工程在污染治理中的应用 [J]. 石油化工高等学校学报, 2003, 16(2): 36-40.

- SHAO Fengqin, HAN Qingxiang. The Application of Enzyme Engineering in the Environmental Pollution Control[J]. Journal of Petrochemical University, 2003, 16(2): 36-40.
- [4] FAJERWERG K, FOUSSARD J N, PERRARD A, et al. Wet Oxidation of Phenol by Hydrogen Peroxide: The Key Role of pH on the Catalytic Behavior of Fe-2SM-5[J]. Water Science & Technology, 1997, 35(4): 103-110.
- [5] 刘 峰, 朱南文, 王亚林, 等. 射流空化技术处理乳化含油废水的研究 [J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(5): 416-419.
- LIU Feng, ZHU Nanwen, WANG Yalin, et al. Study on Experimental Research on Wastewater Treatment with Jetting Cavitational Technology[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2005, 34(5): 416-419.
- [6] 邓松圣, 李赵杰, 张福伦, 等. 空化射流降解毒性有机物实验研究 [J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(6): 46-49.
- DENG Songsheng, LI Zhaojie, ZHANG Fulun, et al. Experimental Study on Degradation of Toxic Organic Compounds with Cavitation Jet Flow[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2009, 25(6): 46-49.
- [7] CHAKINALA A G, GOGATE P R, BURGESS A E, et al. Treatment of Industrial Wastewater Effluents Using Hydrodynamic Cavitation and the Advanced Fenton Process[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(1): 49-54.
- [8] 王金刚, 王西奎, 郭培全, 等. 利用涡流空化效应降解水中罗丹明 B[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 129-131.
- WANG Jingang, WANG Xikui, GUO Peiquan, et al. Degradation of Rhodamine B in Water by Swirling Jet-Induced Cavitation[J]. China Environmental Science, 2007, 27(1): 129-131.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 55-58.
- 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): 55-58.
- [12] 苏 新, 张风华, 邵 军, 等. 具有壅塞环的空化器特性数值分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(2): 5-11.
- SU Xin, ZHANG Fenghua, SHAO Jun, et al. Numerical Analysis on Characteristics of Cavitator with Choking-Ring[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 5-11.
- [13] 单礼伟, 张风华, 唐川林, 等. 基于正交试验的壅塞空化器数值试验 [J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 34-37.
- SHAN Liwei, ZHANG Fenghua, TANG Chuanlin, et al. Numerical Simulation for Choking Cavitator Based on Orthogonal Experiment[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 34-37.

(责任编辑: 廖友媛)