

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.004

# 涡流空化水处理的流场仿真分析

陆 凯, 郭培全, 史锦屏

(济南大学机械工程学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 依据涡流水力空化原理, 构建了污水处理装置模型, 利用 ANSYS CFX 软件进行了计算机仿真, 对装置的结构参数以及影响装置内流体压力分布的因素进行了分析, 并对仿真结果进行了实验和放大模型仿真验证, 进而提出了保证最高降解效率的涡流水力空化污水处理装置的设计原则: 选择合适的涡流仓窄缝宽度; 除在装置底部要设计挡板外, 在涡流仓的顶部增开小孔; 在系统允许压力范围内, 应选择输出压力高的水泵。

**关键词:** 水力空化; 涡流; 污水处理; 流场仿真

**中图分类号:** X703

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1980(2008)06-0743-05

由于工业的迅速发展, 污水量逐年增多, 污染物的成分也越来越复杂, 传统的水处理方法已经显得力不从心。水解法、光催化氧化法等传统的物化处理存在诸多缺点, 例如: 水解法存在酸碱消耗量大, 水解后进一步稀释要消耗大量水资源等问题; 光催化氧化法虽然氧化效率较高, 但存在药剂费用高、反应装置复杂、处理费用高等一系列问题。利用空化效应作为难降解废水的处理方法, 不仅可以有效去除许多难降解物质和有毒物质, 而且具有无二次污染、反应装置简单等优点, 是近年来比较受关注的新型水处理方法<sup>[1]</sup>。本文根据涡流水力空化原理, 构建了污水处理装置模型并对其进行了研究。

## 1 空化降解机理

空化效应是由于液流系统中的局部低压(低于相应温度下液体的饱和蒸气压)使液体蒸发而引起的微气泡爆发性生长现象<sup>[2-3]</sup>。水流中产生空化后, 在空化泡进入正压区产生溃灭的瞬间, 其周围极小的空化范围内会产生 1900~5200 K 高温和超过 50 MPa 的高压, 温度变化率高达  $10^9$  K/s, 并伴有强烈的冲击波和时速高达 100 m/s 的射流。由于这种极端高温、高压、高射流是以每秒数万次连续作用产生的, 在局部可产生足以打断有机物长分子链的能量, 从而实现降解污水中有机物的目的<sup>[4-5]</sup>。

根据空化效应产生的方法不同, 可将其分为声空化效应、水力空化效应、光空化效应和粒子空化效应等 4 种类型<sup>[6]</sup>。水力空化是让流体通过急剧变化的几何截面, 或流速、流向的急剧变化, 出现局部压力低于饱和蒸气压的区域, 形成空化的条件。射流和涡流是形成水力空化的 2 种方法。

从现有资料来看, 获得水力空化的方法无外乎是让流体以一定的速度流过文丘里管或孔板, 其本质是流体通过特定的装置产生射流空化。由于流体在进入这些装置前必须获得很高的初速度, 所以射流和涡流相比要求设备更为复杂, 耗能也更多, 而涡流则能够在较低的进口压力情况下形成空化<sup>[7]</sup>。Chahine 等<sup>[8-9]</sup>利用空化喷射装置在不同的操作条件下进行了降解 P-硝酸苯酚的实验, 结果表明: 水力空化确实对 P-硝酸苯酚有降解作用。以后 Jyoti 等研究了利用水力空化方法对自流井水进行杀菌消毒, 使其达到饮用水标准的效果<sup>[10]</sup>。国内王金刚等<sup>[11]</sup>成功运用涡流空化效应对罗丹明 B 进行了降解试验。本文在 Chahine 等研究成果基础上, 提出了涡流空化污水处理装置模型并进行数值模拟和实验验证。

## 2 涡流空化污水处理装置及仿真模型

理论上能够形成涡流的结构形式很多, 但是结构简单、制造容易的实用结构形式可归纳为图 1 所示的结

收稿日期: 2008-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(20377019)

作者简介: 陆凯(1982—), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事水力空化装置研究。

构形式及其变形.图1所示的涡流空化污水处理装置包括组合仓、涡流仓和挡板,在圆柱形的涡流仓四周均布着4个呈直角的切向窄缝,流体由进口注入组合仓,再通过切向分布的窄缝进入涡流仓,在外界压力的作用下产生很高的切向速度,使得流体在涡流仓内高速旋转产生涡流,而涡流的中心压力很低,会形成低于饱和蒸气压的压力区域.空化气泡在这一区域不断地形成,带有空化泡的流体从涡流仓底部流出,冲击设在底部的挡板,使压力在此时急剧升高,导致空化泡破灭,形成空化效应.在涡流仓顶部设置小孔,让另一股液体从小孔进入,得到一个向下的力,从而更快地将涡流仓形成的涡流排出仓外.

运用 ANSYS Workbench 协同仿真平台构建三维模型并进行网格划分.由于装置窄缝和小孔的存在且尺寸相对较小,在网格尺寸的设置中必须考虑进去,三维网格最大尺寸定义为 5 mm;表面网格中最小边长定义为 0.1 mm、最大边长定义为 5 mm.这样设定得到的 ANSYS CFX 网格模型如图 2 所示,网格数量在 30 万左右.对比试验表明,将网格数提高到 80 万~100 万时,仿真时间会大大增加但精度没有明显提高,所以选择 25 万~30 万网格数,这样在保持计算速度的情况下能够获得相对较高的精度.

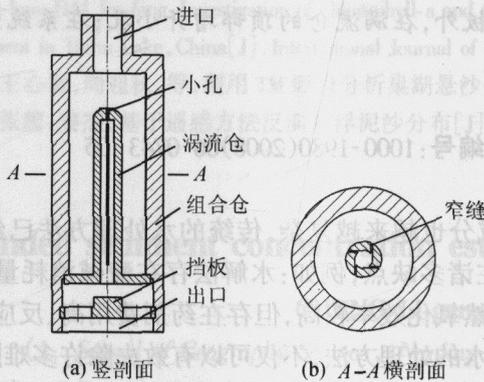


图1 污水处理装置结构

Fig.1 Structure of wastewater treatment device

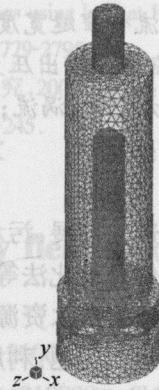


图2 污水处理装置的网格模型

Fig.2 Meshes of wastewater treatment device

### 3 流体仿真

#### 3.1 窄缝和有无小孔对低压区域的影响

影响空化效应强度的因素有很多,如进口压力、温度、液流速度、涡流仓的尺寸、窄缝的宽度、涡流仓顶部是否设置小孔及小孔直径等.运用 ANSYS CFX 计算分析网格模型,对流体状态和压力分布进行模拟计算.当流体进口速度为 3.2 m/s、涡流仓高度为 120 mm、涡流仓内径为 10 mm、水温 25℃时(此温度下水的饱和蒸气压为 3 174 Pa<sup>[12-13]</sup>),在 ANSYS CFX 仿真设置中建立理想空气和水的两相流体模型,将理想空气设为离散相,水设为连续相,并选择标准  $k-\epsilon$  模型为此次仿真的湍流模型,模型中湍流黏度  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ .设水为不可压缩流体,湍流动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  的方程分别定义为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_\epsilon \frac{\epsilon C_{1\epsilon}}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

其中  $G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}$

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

式中:  $G_k$ ——由平均速度梯度产生的湍流动能;  $\rho$ ——流体密度;  $u, v, w$ ——速度分量;  $\mu$ ——液体黏度系数.

涡流仓顶部带孔(直径为 2 mm)和不带孔时,窄缝宽度取值分别为 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm 时的区域最低压力仿真结果如图 3 所示.由于主要考虑空化效应产生的条件和强度,这一方面要看压力是否能够低于该温度下的饱和蒸气压(产生的低压区压力必须低于 3 174 Pa);另一方面要看低压区面积的大小,面积越大形成空化的效果就越好,对有机物的降解效果也就越好.不带孔时低于饱和蒸气压的区域面积为 189.383 mm<sup>2</sup>,带孔时为 309.241 mm<sup>2</sup>,都出现在窄缝宽度为 0.2 mm

时.由图 3 的试验结果曲线可知:(a)随着窄缝宽度的增加,装置所能形成的最低压力呈上升趋势,压力上升到一定阶段趋势将趋于平缓.这一点符合实际情况,当窄缝变宽时流体能够大量且快速地流入涡流仓,仓内外的压力差将逐渐缩小.(b)窄缝宽度在 0.1 mm,0.15 mm,0.2 mm 时,不论涡流仓顶部是否带孔,形成的最低压力都能满足形成空化效应的压力条件.

进一步比较仿真后压力分布云图(图 4),可以看到当窄缝宽度为 0.1 mm 且不带孔时,虽然低于饱和蒸气压区域面积仅次于最大值,但是低压区域明显靠上,不能按照设计的设想通过撞击设在底部的挡板让气泡快速破灭;形成的大量气泡会随着液流流走.窄缝宽度为 0.2 mm 且带孔时,形成的低压区靠近挡板,能够在形成气泡、气泡成长后通过撞击挡板及时地破灭,从而提供打断长分子链需要的能量,达到降解有机物的目的.这也验证了降解装置在涡流仓顶部设置小孔的必要性和合理性.

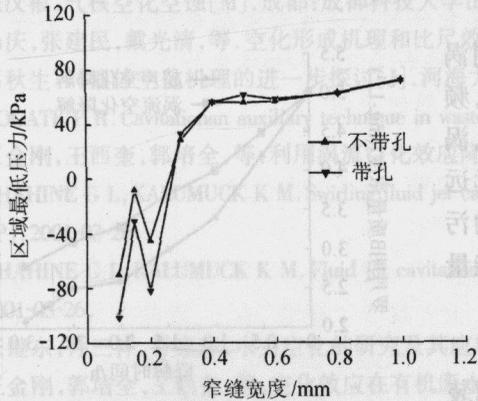
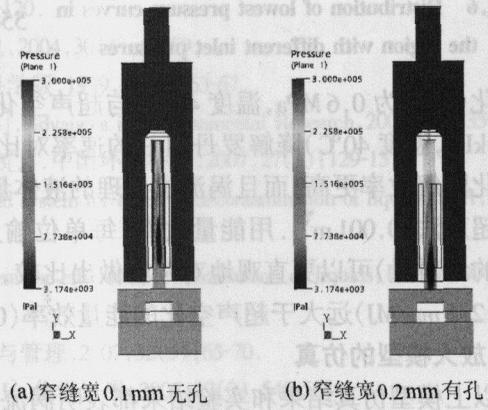


图 3 区域最低压力分布曲线

Fig.3 Distribution of lowest pressure curves in certain region



(a)窄缝宽0.1mm无孔 (b)窄缝宽0.2mm有孔

图 4 仿真结果压力分布云图

Fig.4 Nephograms of simulated pressures

### 3.2 小孔直径对低压区域的影响

仿真分析表明,小孔存在是必要和合理的,但小孔的直径大小对低压区域的影响及影响程度则需要进一步仿真分析.由图 3 得知,窄缝宽度为 0.2 mm 且小孔直径为 2.0 mm 时形成的区域压力最低且低于饱和蒸气压区域面积最大.现取窄缝宽度为 0.2 mm 不变,改变小孔直径大小,直径取值分别为 1.0 mm,2.0 mm,2.5 mm,3.0 mm,3.5 mm,4.0 mm,4.5 mm,5.0 mm,6.0 mm,运用 ANSYS CFX 仿真后比较装置内部形成的区域最低压力值和低于饱和蒸气压区域面积值.

由图 5 中不同小孔直径时区域最低压力分布曲线可以看出,在小孔直径为 2.0 mm 以后随着小孔直径增大,区域最低压力值不断升高,形成不了低于饱和蒸气压区域,小孔直径在 2.0 mm 时形成的区域最低压力最小且低于饱和蒸气压区域面积最大(309.241 mm<sup>2</sup>);虽然小孔直径为 4.0 mm 时出现了奇异点,但是总体趋势是不变的.理论上,当小孔直径增大时由进口进入小孔的流体会不断增加,小孔进口处的压力也会逐渐地接近装置进口处的压力,这样通过涡流在涡流仓里形成的低压区域会因此不断变小,最后就无法形成空化效应区域,也就实现不了装置的污水处理功能.

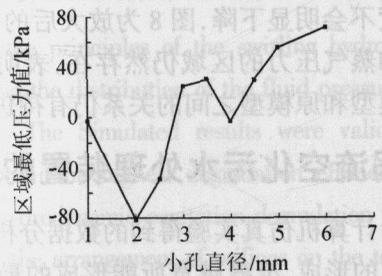


图 5 不同小孔直径时区域最低压力分布曲线

Fig.5 Distribution of lowest pressure curves in the region with different orifice diameters

### 3.3 进口压力对低压区域的影响

该涡流空化污水处理装置进口通过管路连接到水泵出口上,装置的进口压力由水泵提供.在保持装置的结构参数(窄缝宽度为 0.2 mm 和小孔直径为 2.0 mm)不变时,将初始条件中设定流体的初速度值改为设定流体在装置进口处的压力,分别取装置的进口压力为 0.5 MPa,0.6 MPa,0.7 MPa,0.8 MPa,0.9 MPa,1.0 MPa,1.1 MPa,运用 ANSYS CFX 仿真,比较装置内部形成的区域最低压力值和低于饱和蒸气压区域面积.

仿真结果如图 6 所示,可以看出,进口压力和装置内形成的最低压力值呈线性关系,斜率为负值.这证明提高装置的进口压力能够增大低于饱和蒸气压区域面积,空化效应发生的区域也就增大,从而提高装置处理污水的能力.为了使降解效率最大,理论上进口压力可以无限增大,但实际工程运用中,水泵的最大输出压力

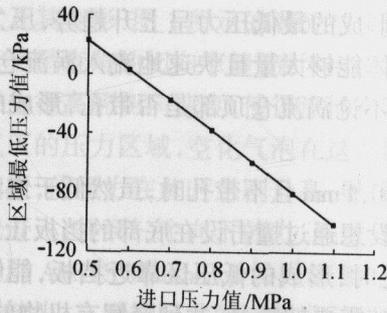


图6 不同进口压力时区域最低压力分布曲线

Fig.6 Distribution of lowest pressure curves in the region with different inlet pressures

图7是采用涡流空化(压力为0.6 MPa,温度40℃)与超声空化(功率150 W,频率20 kHz,温度40℃)降解罗丹明B的速率对比.由图7可见,涡流空化降解效率更高,而且涡流法处理的液体量(0.012 m<sup>3</sup>)远远大于超声法(0.001 m<sup>3</sup>).用能量效率(每单位输入能量降解的污染物的绝对量)可以更直观地对两者做出比较,涡流空化的能量效率(2.5 mg/MJ)远大于超声空化的能量效率(0.15 mg/MJ).

### 3.5 放大模型的仿真

以上模型仿真结果和实验结果都表明涡流空化污水处理装置能够降解有机污水,仿真结果具有可信性.由于实验条件限制,无法在实验室中进行大比例模型实验,故仍采用ANSYS CFX对大比例装置进行仿真以验证大尺寸装置依然可以采用同样结构的装置进行污水处理.

放大模型参数如下:进口和出口面积为原模型的2倍,涡流仓整体尺寸为原模型的1.5倍,窄缝宽度保持不变,长度为原模型的1.5倍,小孔直径仍为2.0 mm,流体在进口的速度为3.2 m/s.这样既保持了进口和出口的压力差不变,又可保证进入窄缝的流体流量增加且切向速度不会明显下降.图8为放大后的模型仿真结果,由图8可知,低于饱和蒸气压力的区域仍然存在,表明装置尺寸放大后仍有效.有关放大模型和原模型之间的关系仍有待进一步的研究.

## 4 涡流空化污水处理装置的设计原则

由计算机仿真实验得到的数据分析可知,涡流仓窄缝的宽度会影响空化的形成,窄缝越宽所能形成的最低压力值就越高;当窄缝宽度超过0.2 mm时,所形成的最低压力值就会高于饱和蒸气压,也就形成不了空化效应.所以,在设计装置时窄缝的宽度必须小于0.2 mm.从降解效果来看,空化效应产生后得让空化泡及时破灭,不能让空化泡长时间的存在影响降解效率.因此,在装置设计过程中除了在底部设计挡板外,还必须在涡流仓的顶部增开小孔.小孔的直径对空化效应有影响,小孔直径越大低压值就越大,低于饱和蒸气压区域面积就越小;当小孔直径为2.0 mm时,装置所能形成的低压值最小,低于饱和蒸气压区域面积最大,空化降解效果最好.在系统压力允许范围内,可以通过选择输出压力高的水泵提高装置的进口压力值,从而提高装置的空化降解效率.该装置可以被放大,但是必须考虑保持涡流仓的压力值和流体进入窄缝和小孔时的速度.

## 5 结论

根据涡流水力空化的原理,构建了结构简单、便于制造的污水处理装置模型,利用流体仿真软件ANSYS

是个定值,管路和装置所能承受的最大压力也是一定的,所以必须考虑实际条件限制,在条件允许的范围内尽可能地提高进口压力,以达到最佳降解效果.

### 3.4 涡流空化污水处理装置降解罗丹明B

以下通过具体实验降解有机物验证涡流空化装置的可行性.实验条件:罗丹明B(上海化学试剂公司,分析纯)溶液的初始质量浓度为5 mg/L,溶液pH值为3.8;溶液总量为12 dm<sup>3</sup>,采用循环处理,金属冷却管控制温度;溶液中罗丹明B的质量浓度测定采用722E可见分光光度计(上海光谱仪器厂),测定波长为554 nm.

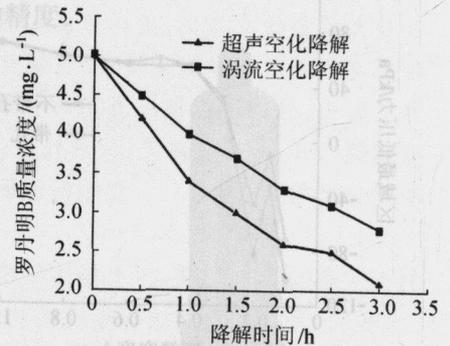


图7 涡流空化和超声空化降解罗丹明B

Fig.7 Rhodamine B for swirling and ultrasonic cavitation degradations

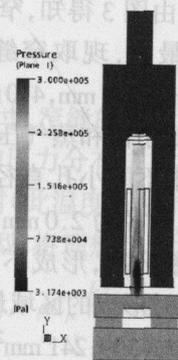


图8 放大模型的仿真压力云图

Fig.8 Nephograms of simulated pressures of large-scale model

CFX进行了计算机仿真,根据仿真和分析的结果提出了涡流空化污水处理装置的设计原则:涡流仓窄缝的宽度会影响空化的形成,当窄缝宽度超过0.2 mm时,产生不了空化效应,所以窄缝的宽度必须小于0.2 mm;空化泡必须及时破灭,才能保证降解效率,因此,除在底部要设计挡板外,在涡流仓的顶部增开小孔,小孔直径为2.0 mm时降解效率最大.在系统允许压力范围内,应选择输出压力高的水泵.该装置可以放大运用,在实际制造过程中必须考虑保持涡流仓的压力值和流体进入窄缝和小孔时的速度.

#### 参考文献:

- [1] 王惠敏,孙三祥.水力空化及其研究现状[J].甘肃科技,2005,21(12):12-15.
- [2] 武君,张晓冬,刘学武,等.水力空化及应用[J].化学工业与工程,2003,20(6):387-391.
- [3] 倪汉根.气核空化空蚀[M].成都:成都科技大学出版社,1993:112-120.
- [4] 杨庆,张建民,戴光清,等.空化形成机理和比尺效应[J].水力发电,2004,30(4):56-59.
- [5] 高秋生.对液体空化机理的进一步探讨[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(5):63-67.
- [6] GOGATE P R. Cavitationan auxiliary technique in wastewater treatment[J]. Advances in Environmental Research,2002(6):335-358.
- [7] 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.
- [8] CHAHINE G L, KALUMUCK K M. Swirling fluid jet cavitation method and system for efficient decontamination of liquids; USA, 6221260 [P]. 2001-03-26.
- [9] CHAHINE G L, KALUMUCK K M. Fluid jet cavitation method and system for efficient decontamination of liquids; USA, 6200486 [P]. 2001-03-26.
- [10] 张键东,孙三祥,乔惠琼.水力空化的研究及其应用[J].环境科学与管理,2007,32(5):65-70.
- [11] 王金刚,郭培全,王西奎,等.空化效应在有机废水处理中的应用[J].化学进展,2005,17(3):549-554.
- [12] 王双成,成泓璐.水的饱和蒸气压的计算[J].河南化工,1999(11):29-34.
- [13] 葛强,李晓红,卢义玉,等.空化射流处理有机废水机理[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(5):19-23.

## Simulation and analysis of flow fields based on swirling hydrodynamic cavitation degradation

LU Kai, GUO Pei-quan, SHI Jin-ping

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** A wastewater treatment device model was established based on the principles of the swirling hydrodynamic cavitation. Various structural parameters of the device and the factors affecting the distribution of the fluid pressure in the device were analyzed by means of the simulation software ANSYS CFX. The Simulated results were validated by experiments and verified by simulation of enlarged models. In order to obtain the highest degradation efficiency, the design principles for the wastewater treatment device based on the swirling hydrodynamic cavitation degradation were put forward: the selection of suitable width of the slits of the swirling chamber, the arrangement of orifices on the top of the swirling chamber in addition to the set-up of baffle plates at the bottom of the device, and the use of water pumps with high output pressure under the allowable pressure scope of the device.

**Key words:** hydrodynamic cavitation; swirling; wastewater treatment; simulation of flow field