内孔空化发生单元在变转速下的性能研究

温江波[1]， 韩桂华[1]， 李大尉[1,2]， 朱宜鹏[1]， 王成军[1]， 谷世杰[1]， 杨英杰[1]
（1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院，哈尔滨 150080；2. 黑龙江省科学院高技术研究院，哈尔滨 150020）

摘 要：为探究转子转速对空化发生单元空化性能的影响，首先建立内孔式旋转空化器空化发生单元的流体域模型。采用周期性数值模拟方法，基于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Schner & Sauer 空化模型对空化发生单元的内部流场进行数值模拟，得到其不同转速（2 000、3 000、4 500、6 000和9 000 r·min^{-1}）下的气相变化规律、压力变化规律及流线分布规律，获知其空化机理。并借助气相云体积和0.1气含率等值面面积得到转速与其空化性能的关系及最佳转速范围。最后，以空化热效应为实验原理，以纯水水样的温升作为实验表征参数进行实验，实验结果表明：转子转速由3 000 r·min^{-1}增大至9 000 r·min^{-1}的过程中，转子转速增大，水样温度也逐渐增加。基于效率及能耗考虑，最佳转速范围为3 000～4 500 r·min^{-1}。

关键词：内孔式旋转空化器；空化发生单元；转速；水溶液温升；空化性能
DOI：10.15938/j.jhust.2026.03.014
中图分类号：O427.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)03-0136-07

Performance Study of Internal-Bore Cavitation Generating Units under Variable Rotational Speeds

WEN Jiangbo[1], HAN Guihua[1], LI Dawei[1,2], ZHU Yipeng[1], WANG Chengjun[1], GU Shijie[1], YANG Yingjie[1]
(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Institute of High Technology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150020, China)

Abstract: In order to explore the influence of rotational speed on cavitation performance of cavitation unit, firstly, a fluid domain model of cavitation unit with an internal-bore rotary cavitator was established. A periodic numerical simulation method was adopted to simulate the internal flow field of cavitation unit based on Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and Schner&Sauer cavitation model. The cavitation mechanism was obtained by analyzing the variations of gas phase, pressure and streamline distribution at rotational speeds of 2 000, 3 000, 4 500, 6 000 and 9 000 r·min^{-1}. The relationship between speed and cavitation performance was obtained by using gas cloud volume and 0.1 Gas volume fraction equivalent area, and the optimal speed range identified. Finally, the cavitation thermal effect was used as the experimental principle, and the temperature rise of pure water samples was used as the experimental characterization parameter. The experimental results show that during the process when the rotational speed increases from 3 000 r·min^{-1} to 9 000 r·min^{-1}, as the rotational speed increases, the temperature of the water samples increases gradually, and the optimal rotational speed range is from 3 000～4 500 r·min^{-1} based on the consideration of efficiency and energy consumption.

Keywords: internal-bore rotary cavitator; cavitation generating unit; rotational speed; temperature rise of aqueous solution; cavitation performance

收稿日期：2024-06-03
基金项目：黑龙江省自然科学基金(E2016040)；国家自然科学基金(51375123)；黑龙江省省属科研院所科研业务费(ZNBZ2023GJS07).
作者简介：温江波(1999—)，男，硕士研究生；
李大尉(1982—)，男，硕士，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：hanguihua99@hrbust.edu.cn.

0　引　言

水力空化是涉及气液两相间传质的非定常多相湍流现象[1]。空化现象伴随着气泡的生长和溃灭,以及气液两相间的质量与能量传递[2]。在空化过程中,通常会产生非常高的温度(1 000 ~ 10 000 K)和压力(10 ~ 50 MPa),这是因为气泡的迅速塌陷会引起机械、热和化学效应[3]。如今,水力空化技术作为新型高效处理技术在许多领域被广泛研究。MADHU 等[4]利用水力空化对孔雀石绿色和甲基紫溶液进行降解;KIM 等[5]利用水力空化反应器进行污泥处理;INNOCENZI 等[6]利用原油和废弃食用油生产生物柴油。

旋转类空化器因水力空化处理效率高而成为研究热点。CERECEDO 等[7]改进了叶片式旋转空化器的定转子结构,转子直径增加,在转子 - 定子内产生更高的空化强度。袁惠新等[8]研究了齿倾角对齿盘式旋转空化器的影响。当齿倾角为 10°时,齿间空化效果达到最优。刘影等[9]讨论了不同孔深、孔径和孔倾角结构对空化性能的影响。当孔倾角为 30°、孔径为 23 mm、孔深为 35 mm 时,内孔式旋转空化器空化效果最好。谢超等[10]研究了不同空化发生单元结构下的空化性能。椭圆形内孔的型线较为光滑,空化效果相较圆锥形和圆柱形的空化发生单元较差。在对其结构参数研究的基础上,BADVE 等[11]使用内孔式旋转空化器处理木材加工废水,在转速1 800 ~ 2 700 r·min^{-1}范围内,转速越大废水降解速率越高。PETKOVŠEK 等[12]观察到当内孔式旋转空化器转速由1 740 r·min^{-1}增大到2 850 r·min^{-1},压力波动变大。文[13]表明,内孔式旋转空化器内牛顿流体随着转子转速的增大,高剪切带的面积也增大,流量越趋于稳定,当转速在2 200 ~ 2 500 r·min^{-1}时,空化活性最大。SUN 等[14]研究了筒式旋转空化器消毒性能,当转速由2 700 r·min^{-1}增大到3 300 r·min^{-1}时,大肠杆菌的灭活率增大到百分之百。葛新峰等[15]发现,当圆盘式旋转空化器转速在1 400 ~ 3 000 r·min^{-1}之间时,低压面积随着转速的上升而增大,在2 000 r·min^{-1}左右开始产生空化。袁惠新等[16]发现,齿盘式旋转空化器在转速1 400 ~ 9 000 r·min^{-1}范围内,最小压力随着转速的增大而减小,空化区域面积随着转速的增大而增大。文[17]表明,自激离心式水力空化反应器在3 600 ~ 4 320 r·min^{-1}的转速范围内,提高转速可得到更大的空泡体积。袁惠新等[18]数值模拟齿筒式齿侧剪切空化器转速由3 000 r·min^{-1}变化至5 000 r·min^{-1},发现空泡体积分数随转速增加而增加。王磊等[19]针对转子 - 径隙式水力空化反应器提出 1 种弧形转子,在转子转速为3 600、4 320和5 760 r·min^{-1}时,弧形转子分别提升反应器内部 0.5%、72.4%、274.1% 的空泡体积。

旋转空化器空化发生单元在定子 - 转子间隙、凹槽和叶轮上,基于旋转离心力及定转子相互运动的剪切力,流体流经空化发生单元引起空泡溃灭,产生空化效应。其中内孔式旋转空化器在结构上相当于数个节流类空化器并联于转子外圆周,定子 - 转子间隙及转子内孔形成了空化发生单元,其空化效率显著提高。因此,本文以内孔式旋转空化器空化单元为研究对象,研究其空化性能的变化规律。

目前研究的旋转空化器转速范围大多在1 400 ~ 5 000 r·min^{-1}范围内,最高可达9 000 r·min^{-1}。本文拟探索转速对内孔式旋转空化器空化单元空化性能的影响规律,并以空化热效应为实验原理,进行纯水溶液温升实验,以验证其影响规律。

1　数值模拟流程

1.1　数值模拟前处理

1)空化发生单元流体域

内孔式旋转空化器空化发生单元为定子 - 转子间隙及转子内孔,空化发生单元各区域的模型如图 1 所示。其结构参数如下:直径为 15 mm、深度为 25 mm、径向倾角为 0°、轴向倾角为 0°、单排空化发生单元个数为 18 个、形状为圆柱形。本文采用周期性数值模拟方法,通过 CFD 软件对内孔式旋转空化器进行流体域抽取,提取出单个的空化发生单元,对各部分壁面命名,得到空化发生单元的流体域模型,如图 2 所示。

2)空化发生单元流体域网格

本文使用 CFD 软件对内孔式旋转空化器空化发生单元的流体域模型进行网格划分,选择 Polyhedra 混合网格划分方法,这是因为混合网格划分对

流体域的不同位置进行网格加密和角度优化时更加便利。空化发生单元流体域模型网格平均的正交质量在 0.96 以上,所有网格倾斜度为 0.03,满足数值模拟计算的要求。

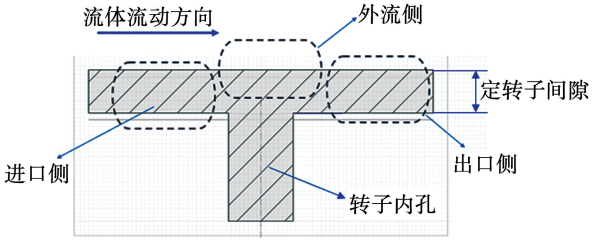


图 1 空化发生单元的各区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the regions of cavitation unit

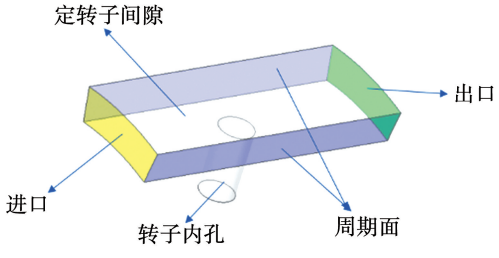


图 2 空化发生单元的流体域模型

Fig. 2 Fluid domain model of cavitation unit

3)网格无关性验证

为了验证网格的无关性,本文选取网格数量为 1.1 万、12 万、20 万、54 万、150 万的网格模型进行数值模拟计算。以气相体积值作为评定指标,具体结果如表 1 所示。

表 1 网格无关性验证

Tab. 1 Grid independence verification

评定指标	单个空化发生单元流体域网格数量/10^4 个				
	1.1	12	20	54	150
气相体积/(10^{-6} m^3)	1.88	1.91	1.97	1.98	1.99

由表 1 可见,当网格数量增加到 20 万时,空化发生单元的气相体积逐渐趋于稳定。因此,在考虑数值模拟计算耗时和计算精确度后,本文空化发生单元流体域模型的网格数量控制在 20 万左右。

1.2 各项参数设置

1)多相流模型和湍流模型

本文数值模拟对象是空化发生单元气液两相流的相间质量传输过程,空化流动具有液相连续、气相分散、相间滑移较弱、局部相变显著的特点。综合计算精度与效率,本文选择了 Mixture 模型。在内孔式旋转空化器空化发生单元的周围存在较复杂剧烈的压力变化、高雷诺数、涡流和旋转剪切力,而 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对平面射流和圆形射流的散布率预测较为精确,可为旋转流动提供较好的性能,因此湍流模型选择 Realizable k – ε 模型。

2)边界条件设置

入口设置为 Velocity Inlet,将动压设置为 3 500 Pa;出口设置为 Pressure outlet,出口压力设置为116 800 Pa;回流湍流强度设置为 5%;选取压力速度耦合算法为 Coupled。

2 空化发生单元性能研究

2.1 不同转速下的气相模拟

前期数值模拟表明,空化发生单元在 0.04 ~ 0.12 s 内稳定生成气泡,且 0.12 s 后空化发展持续稳定。故选取 0.12 s 的计算结果作为本文主要分析工况。

本文选取转速为 2 000、3 000、4 500、6 000 和 9 000 r·min^{-1},探究转速对内孔式旋转空化器空化发生单元的空化性能影响规律,数值模拟得到的气相云图如图 3 所示。

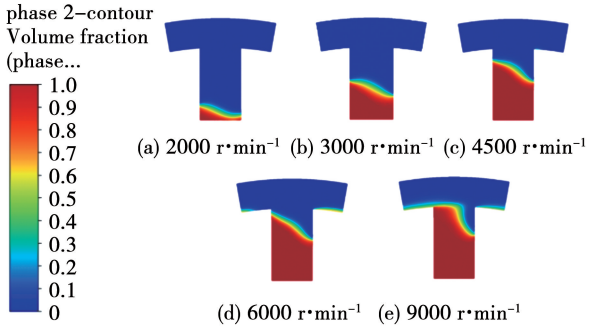


图 3 不同转速下的气相云图

Fig. 3 Gas contour of different rotational speed

由图可见,随着转速增大,空化区的横截面积逐渐增大,空化反应逐渐剧烈,在空化发生单元内产生大量微气泡并且生长直至溃灭。气 – 液两相间的分界面向空化区的上方移动并逐渐靠近空化发生单元顶部。在转速为6 000 r·min^{-1}和9 000 r·min^{-1}时,空化发生单元进出口形成了 1 层片状的空化区。

从 CFD 中提取了空化发生单元不同转速下的气相体积值,如表 2 所示。

表 2　空化发生单元的气相体积

Tab. 2　Gas volume of cavitation units

转速 /(r·min^{-1})	气相体积值 /(10^{-6} m^3·s^{-1})
2 000	0. 556
3 000	2. 014
4 500	3. 150
6 000	3. 399
9 000	4. 038

由表可见,3 000 ~ 4 500 r·min^{-1}范围内气相体积增长率比4 500 ~ 6 000 r·min^{-1}范围内气相体积增长率大;6 000 ~ 9 000 r·min^{-1}范围内的气相体积增长率比4 500 ~ 6 000 r·min^{-1}范围内气相体积增长率大。转速从3 000 r·min^{-1}增加到4 500 r·min^{-1}过程中,空化反应剧烈。因此,空化发生单元的最佳转速范围是3 000 ~ 4 500 r·min^{-1}。

2. 2　不同转速下的压力与流线模拟

空化发生单元的压力云图与流线图如图 4 ~ 5 所示。

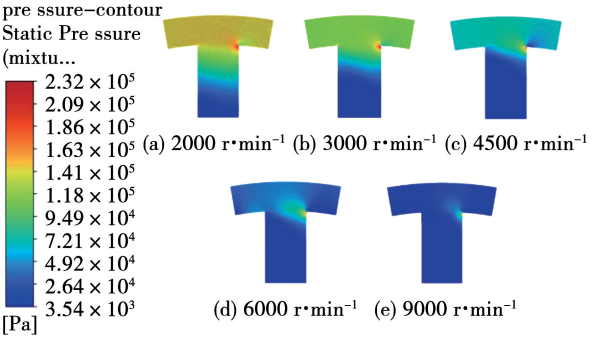


图 4　不同转速下的压力云图

Fig. 4　Pressure contour at different rotational speeds

由图可见,流体撞击空化发生单元壁面。当流体从进口侧进入空化发生单元时,流体在离心力和剪切力的共同作用下,在空化发生单元内形成局部低压区。转速较低时,空化发生单元内形成的低压区较小;随着转速增大,流体流动越剧烈,受到的剪切力和离心力越大,空化发生单元内低压区域扩大。随着转速增大,空化发生单元内、外部的压力都呈减弱趋势,空化发生单元外侧的压力梯度变大。

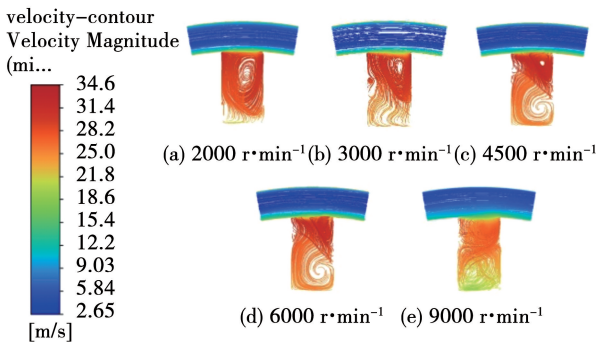


图 5　不同转速下的流线图

Fig. 5　Flow line diagram at different rotational speeds

由图可见,随着流体不断流入空化发生单元内,流体撞击壁面,流体的速度和方向发生突变,在离心力和剪切力的共同作用下,在空化发生单元内形成局部漩涡区,当漩涡逐渐发育完全时,就会形成低速区。转速较低时,空化发生单元内形成的低速漩涡区域较小;随着转速增大,流体流动越剧烈,受到的剪切力和离心力越大,空化发生单元内形成的低速漩涡区域不断扩大,空化也就越剧烈。

综上所述,由于转子的高速旋转,在空化发生单元内出现了较大的离心力,越靠近外流侧压力梯度越明显,空化发生单元外流侧的出口拐角区域出现了最大的压力梯度;在空化发生单元的底部出现了较大的低压区域,从而在空化发生单元底部产生空化效应。随着转速增大,低压区域逐渐向孔口靠近,低速漩涡逐渐由小变大,高速与低速 2 个漩涡带动液体流向空化发生单元内部,促进了空化发生单元内的水汽交换。

2. 3　不同转速下的 0. 1 气含率等值面面积模拟

0. 1 气含率等值面面积主要与空化发生单元中的大漩涡有关,气含率等值面的下方为空化发生单元的空化区域。从 CFD 中提取了空化发生单元不同转速下的 0. 1 气含率等值面的面积,如表 3 所示。

表 3　空化发生单元的 0. 1 气含率等值面面积

Tab. 3　0. 1 Gas volume fraction equivalent area

转速 /(r·min^{-1})	0. 1 气含率等值面面积 /(10^{-4} m^2)
2 000	1. 887
3 000	1. 997
4 500	2. 244
6 000	3. 786
9 000	4. 781

由表可见,转速越大,0.1 气含率等值面面积越大。因此,当考虑 0.1 气含率等值面面积这一空化性能时,空化发生单元最佳转速为6 000 r·min^{-1}。

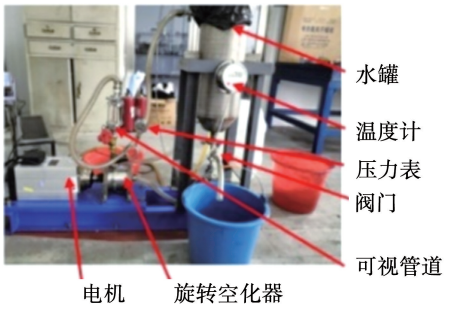
综合考虑气相体积和 0.1 气含率等值面面积,最佳的转速范围为3 000 ~ 6 000 r·min^{-1}。

3 实 验

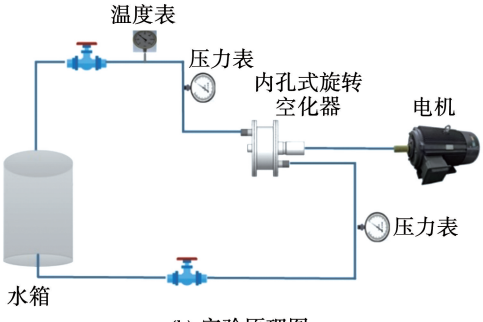
3.1 实验原理

基于空化热效应[20],内孔式旋转空化器旋转过程中会发生气液传输转换过程,气泡在溃灭过程中会产生高温,所以可通过测量空化后水的温升,来验证转速对空化性能的影响。

实验装置图与实验原理图如图 6 所示。



(a) 实验装置图



(b) 实验原理图

图 6 实验反应装置

Fig. 6 Experimental reaction device

该实验主要由水箱、温度计,以及进口压力传感器、水管阀门、电机、空化器等组成。其中内孔式旋转空化器中的水流经水箱进入空化器,经空化作用后最终回到流水箱。该装置可为空化器提供稳定的进水流态,形成循环水。在进水处安装压力表并在出口处安装温度计,可用来测量内孔式旋转空化器在不同工况的温度变化。

3.2 实验结果

本实验共分 3 次进行,为了尽可能减小实验过程带来的误差,取 3 组实验数据的平均值。不同转速下旋转空化器水样温度随时间变化的关系如图 7 所示。

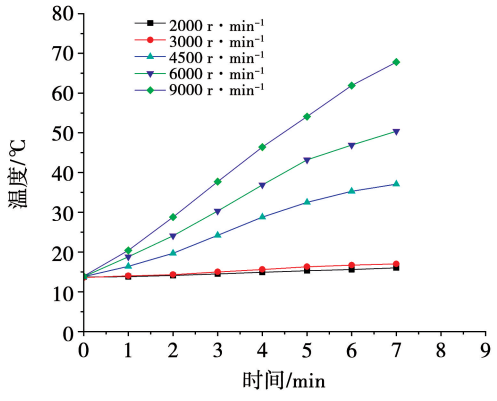


图 7 水样温度图

Fig. 7 Diagram of water sample temperature change

令旋转空化器运行 7 min,每 1 分钟取 1 次水样进行检测,纯水初始温度为 13°。在 7 分钟时不同转速下的旋转空化器水样温度如表 4 所示。

表 4 水样温度与转速

Tab. 4 Water sample temperature and rotational speed

转速 /(r·min^{-1})	温度 /℃	温升(与初始水温相比)/℃
2 000	15.3	2.3
3 000	16.4	3.4
4 500	36.3	23.3
6 000	49.6	36.6
9 000	66.9	53.9

由图 7 和表 4 分析可得:

1)在旋转空化器运行 7 min 时,4 500、6 000 和 9 000 r·min^{-1}转速时实验水样的温升是3 000 r·min^{-1}转速时温升的 6.85 倍、10.76 倍和 15.85 倍,说明在其他参数不变时,随着转速增加,实验水样温升越大,旋转空化器的热效应越显著;

2)3 000 ~ 4 500 r·min^{-1}的温升差值为 19.9°,4 500 ~ 6 000 r·min^{-1}的温升差值为 13.3°,前者是后者温升差值的 1.5 倍;6 000 ~ 9 000 r·min^{-1}的温升差值为 17.3°,4 500 ~ 6 000 r·min^{-1}的温升差值为 13.3°,前者是后者温升差值的 1.3 倍,但前者转速增长幅度是后者的 2 倍,且转速过高(9 000 r·min^{-1})能耗越大,旋转空化器以9 000 r·min^{-1}运

行超过 8 min 会导致电机过热。因此,在基准结构参数下,最佳的转速范围为3 000 ~ 4 500 r·min^{-1}。

4　结　论

1)本文建立了内孔式旋转空化器空化发生单元的流体域模型,通过数值模拟,得到其不同转速下的气相变化规律、压力变化规律:转速越高,气相区域和低压区域越大。

2)通过流线变化得到空化发生单元顶部和底部漩涡变化形态,可知内孔式旋转空化机理为空化发生单元受到较大的离心力,在底部出现了较大的低压区域,从而在底部产生空化效应。高速与低速 2 个漩涡带动了液体流向空化发生单元内部,促进了空化发生单元内的水汽交换。

3)数值模拟定量分析了不同转速下的空化发生单元气相体积,得到空化发生单元的最佳转速范围是3 000 ~ 4 500 r·min^{-1};定量分析了 0.1 气含率等值面的面积,得到空化发生单元的最佳转速为 6 000 r·min^{-1},综合考虑气相体积和 0.1 气含率等值面面积,最佳的转速范围为3 000 ~ 6 000 r·min^{-1}。

4)基于空化热效应,通过温升实验可知在同一运行时间下,转速越高温升越大。基于能耗与效率考虑,最佳转速为4 500 r·min^{-1},与数值模拟结论较为一致。

参 考 文 献:

[1] ANGELE K. Prediction of Cavitation in Orifice Plates—A Novel and Simple Rule-of-thumb[J]. Experimental and Computational Multiphase Flow, 2021, 3: 68.

[2] SARVOTHAMAN V P, SIMPSON A T, RANADE V V. Modelling of Vortex Based Hydrodynamic Cavitation Reactors [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 377: 119639.

[3] 葛宁. 内孔式旋转空化器空化发生机制及参数优选研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.

[4] MADHU G M, ASHLY T, DEEPAK S, et al. Escalation of Degradation of Malachite Green and Methyl Violet Using Hydrodynamic Cavitations Using Different Orifice Geometry[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2015, 5(4): 880.

[5] KIM H, SUN X, KOO B, 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.

[6] INNOCENZI V, PRISCIANDARO M. Technical Feasibility of Biodiesel Production from Virgin Oil and Waste Cooking Oil: Comparison Between Traditional and Innovative Process Based on Hydrodynamic Cavitation[J]. Waste Management, 2021, 122: 15.

[7] CERECEDO L M, DOPAZO C, GOMEZ-LUS R. Water Disinfection by Hydrodynamic Cavitation in a Rotor-stator Device[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 71.

[8] 袁惠新,王赟冰,付双成,等. 齿的倾角对齿盘空化器的性能影响[J]. 常州大学学报(自然科学版),2020, 32(2): 45.
YUAN Huixin, WANG Yunbing, FU Shuangcheng, et al. Effect of Inclination of Teeth on Performance of Disk Cavitation Device[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2020, 32(2): 45.

[9] 刘影,李先林,陈泰然,等. 内孔式旋转空化发生器的数值计算研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(1): 1.
LIU Ying, LI Xianlin, CHEN Tairan, et al. Numerical Study on the Cavitating Flow in a Rotary Cavitation Generator[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(1): 1.

[10] 谢超,张伟,孙伟华,等. 内孔结构对旋转空化发生器水力特性的影响[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(4): 85.
XIE Chao, ZHANG Wei, SUN Weihua, et al. Influence of Inner Hole Structure on Hydraulic Characteristics of Rotary Cavitation Generator[J]. Aerospace Control and Application, 2021, 47(4): 85.

[11] BADVE M, GOGATE P, PANDIT A, et al. Hydrodynamic Cavitation as a Novel Approach for Wastewater Treatment in Wood Finishing Industry[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 106: 15.

[12] PETKOVŠEK M, MLAKAR M, LEVSTEK M, et al. A Novel Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Waste-activated Sludge Disintegration[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 408.

[13] BADVE M P, ALPAR T, PANDIT A B, et al. Modeling the Shear Rate and Pressure Drop in a Hydrodynamic Cavitation Reactor with Experimental Validation Based on KI Decomposition Studies[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 22: 272.

[14] SUN X, PARK J J, KIM H S, et al. Experimental Investigation of the Thermal and Disinfection Performances of a Novel Hydrodynamic Cavitation Reactor[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 13.

[15] 葛新峰,徐旭,来亦姝,等. 旋转圆盘内不同转速的空化特性研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 112.
GE Xinfeng, XU Xu, LAI Yishu, et al. Study on Cavitation Characteristics of Different Rotational Speeds on Rotating Discs[J]. Yellow River, 2019, 41(8):112.

[16] 袁惠新,王赟冰,付双成,等. 旋转齿筒式水力空化器内空化过程[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 203.
YUAN Huixin, WANG Yunbing, FU Shuangcheng, et al. The Cavitation Process in Rotating Toothed Cylindrical Hydrodynamic Cavitator[J]. The Food Industry, 2020, 41(8):203.

[17] 侯瑞杰,刘正杨,宋永兴,等. 自激离心式水力空化反应器的空化特性研究[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(5): 57.
HOU Ruijie, LIU Zhengyang, SONG Yongxing, et al. Study on Hydrodynamic Cavitation Characteristics of Self-excited Centrifugal Cavitation Reactor[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(5):57.

[18] 袁惠新,陆健,周发戚,等. 齿筒式齿侧剪切空化器空化性能数值模拟[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 192.
YUAN Huixin, LU Jian, ZHOU Faqi, et al. Numerical Simulation Research on Cavitation Perfor-mance of the Tooth Side Shear Cavitator[J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (9): 192.

[19] 王磊,刘正杨,王志文,等. 转子-径隙式水力空化反应器空化性能优化研究[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(2): 176.
WANG Lei, LIU Zhengyang, WANG Zhiwen, et al. Cavitation Performance Optimization of Rotor-Radial Groove Hydrodynamic Cavitation Reactor[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2024, 44(2):176.

[20] 韩桂华,陈林秋,李大尉,等. 孔板空化器参数数值模拟与实验[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(4): 86.
HAN Guihua, CHEN Linqiu, LI Dawei, et al. Numerical Simulation and Experiment of Orifice Plate Cavitator Parameters[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(4):86.

(编辑:温泽宇)