转子–径隙式水力空化反应器空化性能优化研究

王磊 刘正杨 王志文 宋永兴 张林华*
(山东建筑大学 热能工程学院 济南 250101)

Cavitation Performance Optimization of Rotor-Radial Groove Hydrodynamic Cavitation Reactor

WANG Lei, LIU Zhengyang, WANG Zhiwen, SONG Yongxing, ZHANG Linhua*
(*School of Thermal Engineering*, *Shandong Jianzhu University*, *Jinan* 250101, *China*)

Abstract Because of its high cavitation intensity and high cavitation rate, the rotor-radial groove hydraulic cavitation reactor has been widely used in industrial fields such as disinfection and sewage treatment. An arc type of rotor is proposed, and the cavitation performance of the arc rotor and the original rotor at different speeds is analyzed by numerical calculation. The interaction between the stator and the rotor is analyzed, and the influence of changing the installation angle of the arc rotor blade inlet on the cavitation performance of the reactor is studied. The results showed that the arc rotor greatly improved the cavitation intensity and cavitation rate in the reactor at different speeds. In the rotor region, cavitation occurs on the suction surface of the rotor blade, corresponding to the low pressure region. In the stator region, when the rotor blade turns the stator blind hole, the fluid is strongly sheared, the pressure inside the blind hole and the separation area between the inlet and outlet decreases, the vorticity increases, and shear cavitation and vortex cavitation occur. Increasing the installation angle of the blade inlet can greatly increase cavitation intensity and improve reactor performance.

Keywords Arc rotor，Hydraulic cavitation reactor，Entrance installation angle，Optimize performance

摘要 旋转型水力空化反应器因其空化强度大，空化率高，已被广泛应用于杀菌消毒，污水处理等工业领域。文章提出一种弧形转子，通过数值计算分析弧形转子与原转子在不同转速下反应器内部空化性能，分析定子与转子之间的相互作用，研究改变弧形转子叶片入口安装角对反应器内部空化性能的影响。结果表明，在不同转速下，弧形转子均极大提高反应器内部空化强度，提高空化率。转子区域，空化发生于转子叶片吸力面，与低压区相对应；定子区域，转子叶片转过定子盲孔时，对流体进行强剪切，盲孔内部与进出口分离区压力降低涡量增大，发生剪切空化以及涡空化。增大叶片入口安装角度可以极大增加空化强度，提高反应器性能。

关键词 弧形转子 水力空化反应器 入口安装角 优化性能
中图分类号: TH12 **文献标识码:** A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202310004

当液体局部压力低于该温度下饱和蒸气压力时，液体会发生气化产生空泡，空泡溃灭时会产生局部热点、冲击波和剪切应力，局部热点温度可达5000°C，压力为 500 个大气压[1]。同时发生热效应，机械效应以及化学效应[2-4]。这种空泡溃灭创造的极端液体环境可以有效地应用于饮用水消毒，废水处理，医学应用，食品加工[5-9]。

常见水力空化的发生装置，如文丘里空化反应器，孔板空化反应器，壅塞空化反应器结构简单，维护成本低，但其能量损失大，空化强度小，空化率低，材料易腐蚀，无法大规模使用[10]。而旋转型水力空化反应器具有能量损失小，空化强度高等优点，受

收稿日期: 2023−10−16
基金项目: 山东省自然科学基金项目（ZR2021QE157）；压缩机技术国家重点实验室（压缩机技术安徽省实验室）开放基金项目（SKL-YSJ202108）
* **联系人:** E-mail: zhth0015@sdjzu.edu.cn

到了广泛研究[11]。

Badve 等[12] 研究了狭缝型文丘里空化装置与圆柱形文丘里空化装置对被污染海水消毒程度的效果, 结果表明, 相同能耗情况下, 狭缝型消毒率远远高于圆柱形。陈乐等[13] 提出不同孔口大小、孔口数量 、孔口排列方式、孔口流速对大肠杆菌杀菌率的影响, 结果表明, 减小孔口大小、增加孔口数量、提高孔口流速可以提高杀菌率。孙浩胜等[14] 研究了在单孔板与并联孔板体系中改变孔板角度, 孔口数量, 不同温度与入口压力, 初始浓度对于碱性有机染料的降解效果和产热效率, 为大规模降解有机染料和资源化利用热源提供新的方法。

在宋永兴等[15] 之前的研究中, 提出一种转子-径隙式水力空化反应器, 通过模拟分析不同形状盲孔、不同定转子之间相互作用距离和不同转子转速时反应器产生的空泡体积, 结果表明, 该反应器极大提高能量利用率与空化强度且整体结构较为复杂但结构模块较简单, 易于拆卸进行维护、维修或者更换。但其仍存在极大优化空间。

本文提出一种弧形转子, 首先与原转子在不同转速时进行数值分析, 比较空泡体积, 其次改变叶片入口安装角进行数值分析, 最后对反应器内部空化产生、发展、以及溃灭进行分析, 结果表明, 该转子极大提高了本反应器的空化性能。

1　数学模型

1.1　计算参数设置

本次模拟将 298 K 的水作为介质, 其液体气化压力为 3169 Pa, 采用速度入口边界条件与压力出口边界条件, 入口速度设置为 0.9947 m/s, 出口压力设置为自由压力, 壁面温度设置为恒温 300 K。

1.2　空泡动力学方程

根据液体气核理论表示气核在低压环境下持续足够长的时间会得到充分发展, 从而产生空化。根据力学平衡条件, 气核内外压强平衡公式为:

$$p_0 = p + \frac{2\sigma}{R} \tag{1}$$

式中: p、p_0 分别表示气核外、内压强, Pa; σ 为空泡表面张力, N; R 为空泡半径, m。

根据气核悖论, 气核半径偏大会导致空泡浮出水面溃灭, 气核半径偏小会导致气核在液体中溶解。气核发展为空泡的临界压力与临界半径[16] 分别为:

$$p_c = -\frac{2\sigma(1-3\gamma)}{3R_0\gamma} + p_v \tag{2}$$

$$R_c = \left(\frac{2\sigma}{3pC_0^2R_0^3\gamma}\right)^{\frac{1}{1-3y}} \tag{3}$$

式中: R_0 为气核初始半径, m; $C_0^2=P_0/\rho$, 其中 p_0 为初始气核内部压力值, Pa; ρ 为液体密度, kg/m^3; p_v 为气核内部的蒸汽压力, Pa; γ 为气体绝热系数。

1.3　空化模型

空化模型采用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型, 该模型可以捕捉到空泡生长、发展以及溃灭时的细节。在空泡生长发展阶段时, $p<p_v$, 其相变率为:

$$R_e = F_{\text{vap}}\frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_{\text{B}}}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_v-p}{\rho_1}}\,(p<p_v) \tag{4}$$

当空泡发展到一定阶段时, $p>p_v$, 成核点密度降低, 其相变率[17] 为:

$$R_c = F_{\text{con}}\frac{3\alpha_v\rho_v}{R_{\text{B}}}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p-p_v}{\rho_1}}\,(p>p_v) \tag{5}$$

式中: R_{B} 为空泡半径, m; p_v 为饱和蒸汽压力, Pa; α_v 蒸汽体积分数; ρ_1 为流场密度, kg/m^3; ρ_v 为蒸汽密度, kg/m^3 。

1.4　湍流模型

RNG k-ε 模型是针对完全不可压缩单相流体而设计, 但空化流体是由可压缩的两相流体组成, 所以无法准确预测空泡的发展以及溃灭[18]。而标准 k-ε 模型将速度和长度分开线性独立求解, 在实际工程中, 可以计算出绝大多数湍流流动问题, 灵活性较强准确性较高。其中 k, ε 分别是湍流动能和湍流涡耗散[19], 其公式分别为:

$$\rho\frac{\mathrm{d}\vec{k}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \tag{6}$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{7}$$

其湍流黏度公式为:

$$\mu_t = \rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

式中: k 为湍流动能, m^2/s^2; ε 为湍动能耗散, m^2/s^3; σ_k 为湍动能的湍流普特朗数, σ_k=1.0; σ_ε 为湍动能耗散的湍流普特朗数, σ_ε=1.3; ρ 为湍流密度, kg/m^3; μ_t 为湍流粘滞性系数, N·S/m^2; G_K 表示由于平均速度梯

度引起的湍动能产生；G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。

1.5 空泡体积与空化率

在本研究中，使用反应器内空泡产生体积以及空化率来对比反应器产生空化的强度。空化率是流体域内总空泡体积与流体域内总体积之比，空化率衡量了在给定体积内发生空化的程度[15]。

$$\alpha = \frac{V_{\text{vapor}}}{V_{\text{total}}} \tag{9}$$

式中：α 为空化率；V_{vapor} 为流体域内总空泡体积，mm^3；V_{total} 为流体域内总体积，mm^3。

1.6 网格无关性验证

合理的网格划分可以提高计算效率，同时又不影响数值模拟的精度和可靠性。选取 4 组不同网格数量的模型，以转子叶片吸力面一点在转速为 4320 r/min 时进行压力监测。空化发生的原理为流体局部压力远低于该状态下饱和蒸气压，因此该点为负压。如表 1 所示，网格数为 576.9 万，278.6 万时，压力几乎相同，为减小计算量，提高计算精度，选择方案 3。

表 1 网格数量与压力关系

Tab. 1 Grid number and pressure relationship

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
网格数/万	98.8	155.4	278.6	576.9
监测点压力/kPa	−92.64	−95.84	−96.37	−96.46

2 模型建立

2.1 转子-径隙式水力空化反应器

本研究以转子-径隙式水力空化反应器为研究对象，其结构如图 1 所示，包括外壳、转子、定子和轴，外壳为蜗壳式结构。定子为圆盘结构，其中心设置流体通道，流体通道与流体入口相对应，定子面上设置多个未穿透的盲孔。转子由轮毂与叶片组成，叶片正对定子，轮毂正对外壳。流体入口位于外壳正面，流体出口位于外壳侧面。电机带动转子旋转，流体由流体入口进入，通过流体通道进入定子与转子之间的间隙，最后通过流体出口被甩出。该反应器相对于常见的水力空化反应器文丘里、孔板水力空化反应器等具有空化率高，能量损失小等优点，但仍然存在优化的空间。

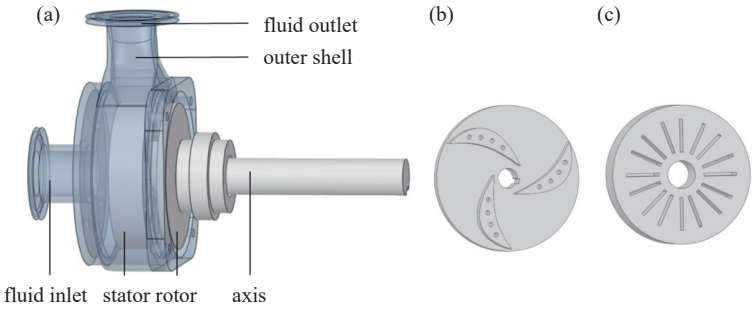

图1 转子-径隙式水力空化反应器结构图。(a)结构图，(b)转子，(c)定子

Fig. 1 Structural diagram of rotor clearance hydraulic cavitation reactor. (a) Structure diagram, (b) rotor, (c) stator

2.2 弧形转子

本文提出一种弧形转子，转动时叶片不仅与流体进行强剪切发生剪切空化，同时叶片吸力面形成低压区，产生空泡，发生更加强烈的空化。其结构示意图如图 2 所示。以轴圆心建立直角坐标系，125°，3/5 半径处为圆心，吸力面叶型为：

$$\left(x+\frac{7}{20}r\right)^2+\left(y-\frac{1}{2}r\right)^2=\left(\frac{21}{40}r\right)^2 \tag{10}$$

其中 β_1 为 56°，β_2 为 34°。压力面叶型为：

$$\left(x+\frac{7}{20}r\right)^2+\left(y-\frac{1}{2}r\right)^2=\left(\frac{24}{40}r\right)^2 \tag{11}$$

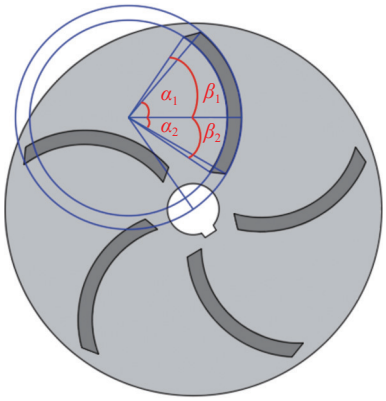

图2 弧形转子结构图

Fig. 2 Structural diagram of arc-shaped rotor

其中 α_1 为 50°, α_2 为 30°。转子上均匀附有 5 个叶片, 厚度为 3mm, 高度为 5mm。

2.3　弧形转子与原转子在不同转速时对反应器空化性能的影响

通过对弧形转子与原转子在不同转速时反应器内部空泡体积以及空化率进行对比来研究反应器内部空化性能, 详细信息如图 3 所示。

当提高转子转速时, 反应器内部空泡体积均显著增加。这是由于流体在高速流动的情况下, 流体内部压强降低及出现低压区, 更有利于空化的发生[20]。同时也增强叶片与流体的剪切作用, 增加剪切空化的产生, 所以, 通过增大转速来增强反应器内空化强度是可行的。具体到两种转子在不同转速下反应器内空泡体积变化, 可以参考表 2 进行分析和比较。

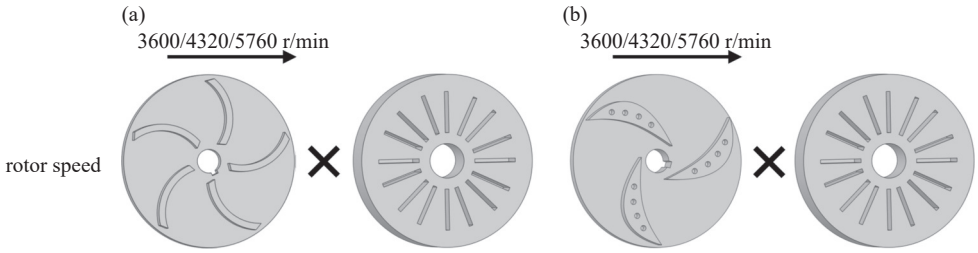

图3　两种转子不同转速下对比。(a)弧形转子, (b)原转子

Fig. 3　Comparison of two types of rotors at different speeds. (a) Arc rotor, (b) original rotor

表 2　弧形转子与原转子在不同转速下反应器内的空泡体积

Tab. 2　Void volume inside the reactor of arc-shaped rotor and original rotor at different speeds

转子	转速/(r/min)	空泡体积/mm^3	流体域总体积/mm^3	空化率/%
原转子	3600	9	295038	0.003
	4320	779	295038	0.264
	5760	4888	295038	1.657
弧形转子	3600	24	296266	0.008
	4320	2926	296266	0.988
	5760	13029	296266	4.398

当转子转速达到 3600 r/min 时, 原转子反应器内部只产生 9 mm^3 空泡, 弧形转子反应器内部只产生 24 mm^3 空泡, 空化率极低, 优化效果不明显。当转子转速增加到 4320 r/min 时, 原转子反应器内部空泡体积增加了 770 mm^3, 空化率增加 0.261%。弧形转子反应器内部空泡体积增加 2902 mm^3, 空化率增加 0.980%。当转子转速继续增加到 5760 r/min 时, 反应器内部空化强度极大提升, 原转子反应器内部空泡体积由 779 mm^3 增加到 4888 mm^3, 空化率由 0.264% 提升到 1.657%, 弧形转子反应器内部空泡体积由 2926 mm^3 增加到 13029 mm^3, 空化率由 0.988% 提升到 4.398%。

通过数据比较, 弧形转子相较于原转子在提高反应器内部空化性能方面表现出极大的改进, 达到优化效果。

3　弧形转子优化反应器空化性能分析

3.1　弧形转子空化结果分析

弧形转子的空化呈现周期性变化规律, 如图 4 所示, 以下对转子一个周期总时间(T)分为五个时段进行分析。转子转速为 4320 r/min 时, 一个叶轮旋转周期内的空化云图与压力云图如图 4 所示。低压区域位于叶片的吸力面, 越靠近吸力面压力越低, 压力在−90500 Pa ~ −98000 Pa 的范围内, 低于该温度下饱和蒸气压, 空化位置与低压位置相对应。

以下以 1 号叶片为例进行分析, 0 T-1/5 T, 低压区面积减小, 空化强度减弱。1/5 T-2/5 T, 低压区面积增大, 空化强度增强。2/5 T-4/5 T, 低压区面积再次减小, 空化强度再次减弱。4/5 T- T, 低压区面积再次增大, 空化强度再次增强。一个周期, 空泡经历了收缩-增长-收缩-增长四个阶段。

3.2　定子空化结果分析

当转子高速转动且通过定子盲孔时, 流体以高速流入以及流出盲孔, 盲孔内压力降低, 涡量升高, 使得盲孔内部产生大量剪切空化与涡空化, 其内部

空化特性具有周期性, 一个周期为 2.852 ms。图 5 ~ 图 8 以 1 号盲孔为例从气相、压力、速度、涡量四个方面描述了盲孔内空化一个周期的变化情况。

0 ms 时, 转子开始转动, 部分流体以 12 m/s 的速度从主通道流出, 以 8 m/s 的速度进入盲孔, 形成

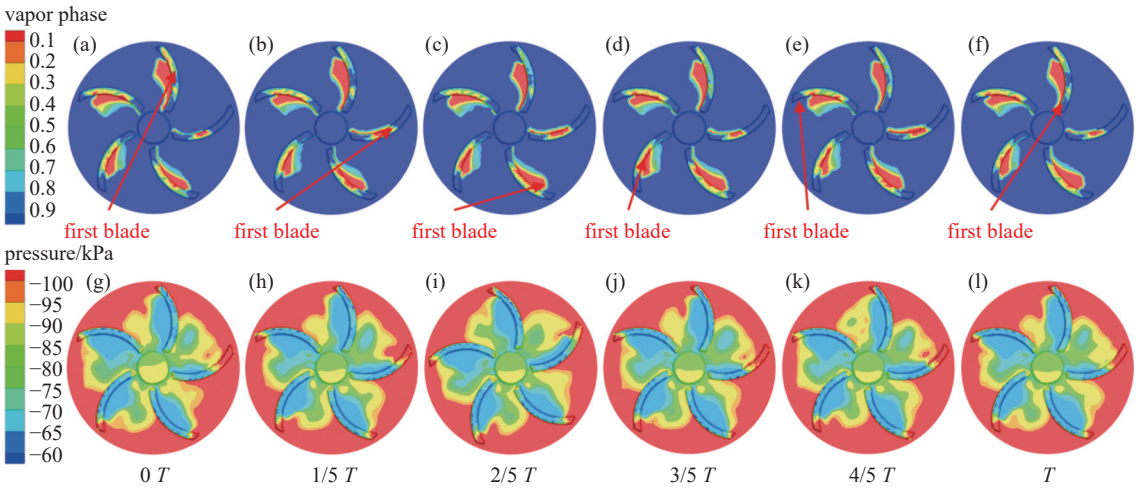

图4 转子一个周期内空化云图以及压力云图。(a) 0 *T* 气相，(b) 1/5 *T* 气相，(c) 2/5 *T* 气相，(d) 3/5 *T* 气相，(e) 4/5 *T* 气相，(f) *T* 气相，(g) 0 *T* 压力，(h) 1/5 *T* 压力，(i) 2/5 *T* 压力，(j) 3/5 *T* 压力，(k) 4/5 *T* 压力，(l) *T* 压力

Fig. 4 Cavitation cloud and pressure cloud of the rotor within one cycle. (a) 0 T vapor phase, (b) 1/5 T vapor phase, (c) 2/5 T vapor phase, (d) 3/5 *T* vapor phase, (e) 4/5 *T* vapor phase, (f) *T* vapor phase, (g) 0 *T* pressure, (h) 1/5 *T* pressure, (i) 2/5 *T* pressure, (j) 3/5 *T* pressure, (k) 4/5 *T* pressure, (l) *T* pressure

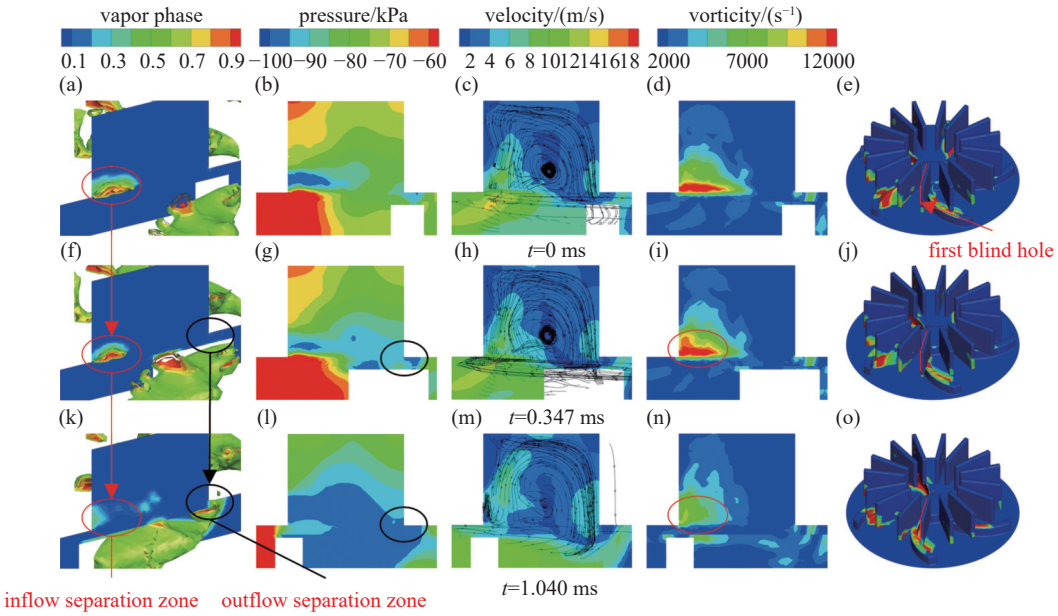

图5 不同时刻盲孔内气相、压力、速度、涡量变化图。(a) 0 ms 气相，(b) 0 ms 压力，(c) 0 ms 速度，(d) 0 ms 涡量，(e) 0 ms 转子，(f) 0.347 ms 气相，(g) 0.347 ms 压力，(h) 0.347 ms 速度，(i) 0.347 ms 涡量，(j) 0.347 ms 转子，(k) 1.040 ms 气相，(l) 1.040 ms 压力，(m) 1.040 ms 速度，(n) 1.040 ms 涡量，(o) 1.040 ms 转子

Fig. 5 Changes of vapor phase, pressure, velocity and vorticity in the blind hole at different times. (a) 0 ms vapor phase, (b) 0 ms pressure, (c) 0 ms velocity, (d) 0 ms vorticity, (e) 0 ms rotor, (f) 0.347 ms vapor phase, (g) 0.347 ms pressure, (h) 0.347 ms velocity, (i) 0.347 ms vorticity, (j) 0.347 ms rotor, (k) 1.040 ms vapor phase, (l) 1.040 ms pressure, (m) 1.040 ms velocity, (n) 1.040 ms vorticity, (o) 1.040 ms rotor

涡流，占据盲孔大部分体积并在进入与退出盲孔时形成入口分离区和出口分离区。从 0 ms−0.347 ms 时转子叶片压力面开始接近盲孔，与出口分离区发生剪切，压力降低，产生剪切空化。*t*=1.040 ms 时，由于转子叶片压力面接近盲孔，破坏了入口分离区的稳定状态，入口分离区涡量从 12000 s^{-1} 减小到 6000 s^{-1}，入口分离区空泡溃灭。

叶片在 1.040 ms 时开始远离出口分离区，剪切

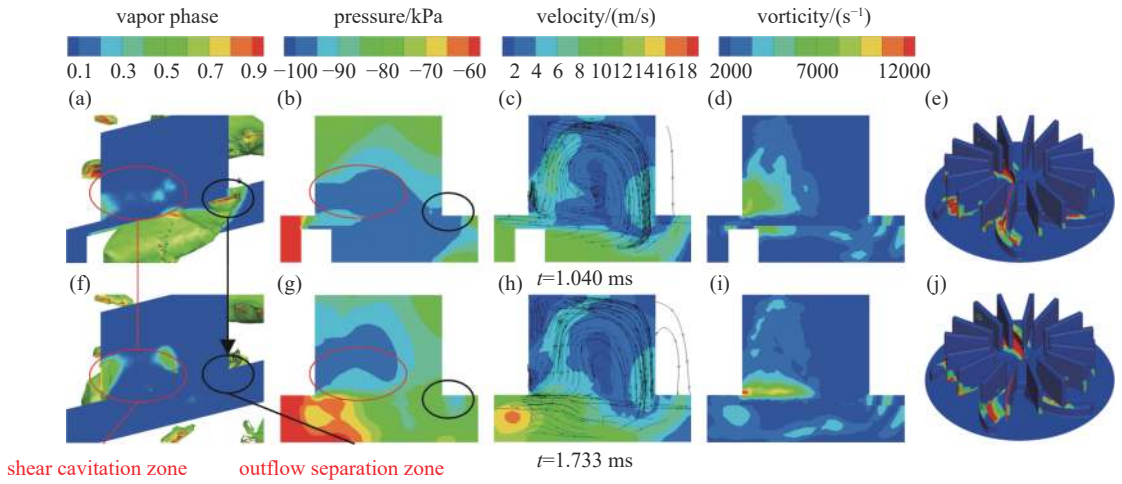

图6　不同时刻盲孔内气相、压力、速度、涡量变化图。(a) 1.040 ms 气相, (b) 1.040 ms 压力, (c) 1.040 ms 速度, (d) 1.040 ms 涡量, (e) 1.040 ms 转子, (f) 1.733 ms 气相, (g) 1.733 ms 压力, (h) 1.733 ms 速度, (i) 1.733 ms 涡量, (j) 1.733 ms 转子

Fig. 6　Changes of vapor phase, pressure, velocity and vorticity in the blind hole at different times. (a) 1.040 ms vapor phase, (b) 1.040 ms pressure, (c) 1.040 ms velocity, (d) 1.040 ms vorticity, (e) 1.040 ms rotor, (f) 1.733 ms vapor phase, (g) 1.733 ms pressure, (h) 1.733 ms velocity, (i) 1.733 ms vorticity, (j) 1.733 ms rotor

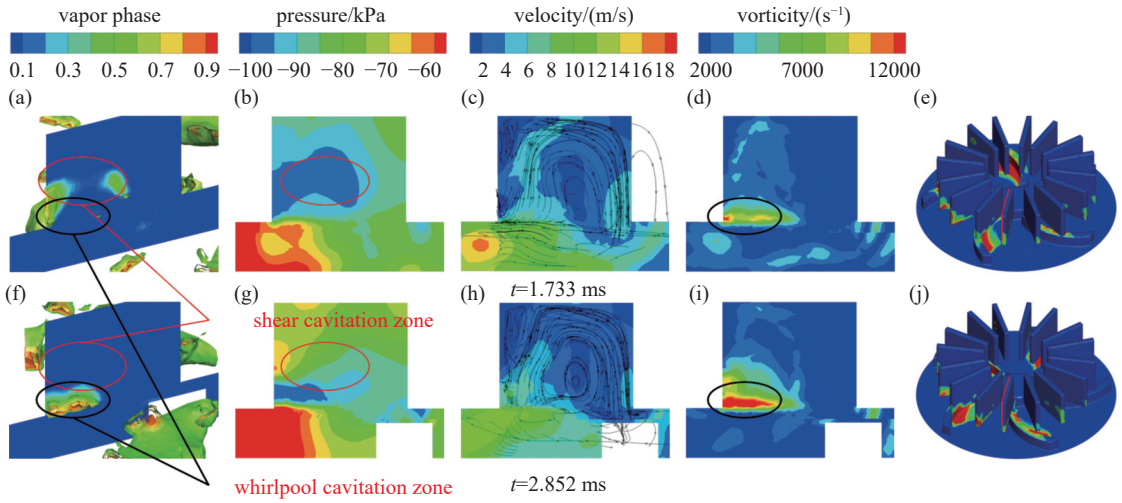

图7　不同时刻盲孔内气相、压力、速度、涡量变化图。(a) 1.733 ms 气相, (b) 1.733 ms 压力, (c) 1.733 ms 速度, (d) 1.733 ms 涡量, (e) 1.733 ms 转子, (f) 2.852 ms 气相, (g) 2.852 ms 压力, (h) 2.852 ms 速度, (i) 2.852 ms 涡量, (j) 2.852 ms 转子

Fig. 7　Changes of vapor phase, pressure, velocity and vorticity in the blind hole at different times. (a) 1.733 ms vapor phase, (b) 1.733 ms pressure, (c) 1.733 ms velocity, (d) 1.733 ms vorticity, (e) 1.733 ms rotor, (f) 2.852 ms vapor phase, (g) 2.852 ms pressure, (h) 2.852 ms velocity, (i) 2.852 ms vorticity, (j) 2.852 ms rotor

减弱, 直到 1.733 ms, 出口分离区压力增高, 空泡溃灭。同时, 转子叶片压力面接近入口分离区, 流体流速由 4 m/s 增加到 6 m/s, 与入口分离区发生剪切, 压力降低, 产生剪切空化并迅速发展, 在 1.733 ms 时剪切空化最为剧烈。

叶片在 1.733 ms 时开始远离入口分离区, 2.852 ms 时完全通过入口分离区, 剪切消失, 入口分离区压力增高, 空泡溃灭。同时, 入口分离区流体流速增大, 涡量由 7000 s^{-1} 增大到 12000 s^{-1}, 入口分离区产生独立的涡空化, 并迅速发展。

此时, 定子盲孔内一个空化周期结束, 新的转子叶片产生大量空泡并接近盲孔, 新的循环即将开始。

4　弧形转子叶片安装角对反应器空化性能的影响

转子叶片形状为弧形, 入口安装角 γ 为 99°, 其

平面结构如图 8 所示。每个叶片绕固定点(如图 8 中 p 点)转动，增大入口安装角 10°、20°、30°、40°，选取五种方案进行计算和分析，具体的转子主要结构参数如表 3 所示。

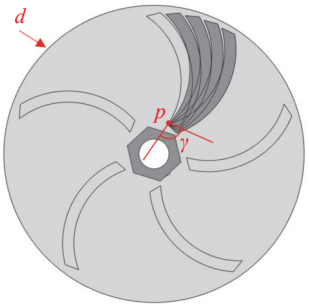

图8 弧形转子叶片安装角结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of installation angle structure of curved rotor blades

表 3 转子模型的主要参数

Tab. 3 Main parameters of the rotor model

参数	符号	数值
直径/mm	d	80
叶片数/个	z	5
叶片入口安装角/(°)	γ	99、109、119、129、139

采用计算流体力学(CFD)进行数值分析，以 298 K 的水作为介质，反应器壁面恒温 300 K，流体入口速度为 0.9947 m/s，出口压力为自由压力，转子转速 4320 r/min，旋转 25 圈，反应器内部空泡总量稳定后进行的对比分析。

转子旋转初期空化不稳定，空泡体积大幅波动，十圈以后空化处于稳定状态，空化反应器内空泡总量呈周期性变化。入口安装角为 99°的转子，稳定后反应器内空泡体积平均值为 2963.4 mm^3；入口安装角为 109°的转子，稳定后反应器内空泡体积平均值为 3841.5 mm^3；入口安装角为 119°的转子，稳定后反应器内空泡体积平均值为 4559.3 mm^3；入口安装角为 129°的转子，稳定后反应器内空泡体积平均值为 4920.9 mm^3；入口安装角为 139°的转子，稳定后反应器内空泡体积平均值为 5027.3 mm^3。

可以观察到随转子入口安装角度数的增加，反应器内部产生的空泡体积也随之增加。当转子叶片入口安装角度达到 139°，这已经是叶片可达到的最大入口安装角度，继续增大入口安装角度将导致叶片与螺母进行碰撞。对于这五种转子，从转动开始到结束，空泡体积的具体变化如图 9 所示。

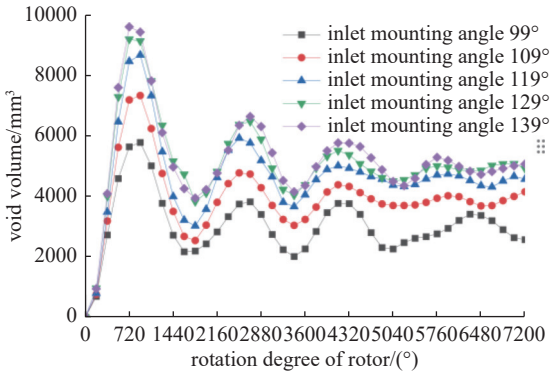

图9 不同转子叶片入口安装角反应器内部空泡体积的曲线变化图

Fig. 9 Curve variation of internal void volume in reactors with different rotor blade inlet installation angles

5 结论

文章针对转子-径隙式水力空化反应器的空化性能问题，提出一种弧形转子，对反应器进行数值计算研究，分析定转子之间的相互作用。在优化过程中考虑叶片入口安装角对空化反应器的影响，得到以下结论：

(1)在转子转速为 3600 r/min，4320 r/min，5760 r/min 时，弧形转子分别提升反应器内部 266.7%、374.2%、265.4 的空化性能。

(2)转子区域，空化发生于转子叶片吸力面，与低压区相对应。一个空化周期空泡经历了收缩-增长-收缩-增长四个阶段。定子区域，空化发展呈现周期性，转子叶片转过定子盲孔时，对流体进行强剪切，盲孔内部产生剪切空化，入口分离区产生涡空化，出口分离区产生剪切空化随后周期性溃灭，一个周期为 2.852 ms。

(3)转子叶片入口安装角度从 99°增加到 109°、119°、129°、139°，反应器内空泡体积相较 99°分别增加 29.6%、53.9%、66.0%、69.7%。转子转速 4320 r/min 时叶片安装角为 139°的转子较原转子提高反应器内空泡体积 645.3%。

参 考 文 献

[1] Ge M, Sun C, Zhang G, et al. Combined suppression effects on hydrodynamic cavitation performance in Venturi-type reactor for process intensification[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106035

[2] Xu B, Liu K, Deng J, et al. Thermodynamic effect on attached cavitation and cavitation-turbulence interaction around a hydrofoil[J]. Ocean Engineering, 2023, 281:

114764

[3] Pandit A V, Sarvothaman V P, Ranade V V. Estimation of chemical and physical effects of cavitation by analysis of cavitating single bubble dynamics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105677

[4] Darandale G R, Jadhav M V, Warade A R, et al. Hydrodynamic cavitation a novel approach in wastewater treatment: A review[J]. Materials Today:Proceedings, 2023, 77: 960−968

[5] Song Y, Hou R, Zhang W, et al. Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage: -A review[J]. Water Science and Technology, 2022, 86(2): 302−320

[6] Hou R, Song Y, Liu J, et al. Experimental and numerical investigation on the disinfection characteristics of a novel rotor-radial groove hydrodynamic cavitation reactor[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 260−269

[7] Mohod A V, Teixeira A C S C, Bagal M V, et al. Degradation of Organic Pollutants from Wastewater using Hydrodynamic Cavitation: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023: 109773

[8] Yu Y, Mahmud M, Vyas N, et al. Cavitation in a periodontal pocket by an ultrasonic dental scaler: A numerical investigation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106178

[9] Castro-Muñoz R, Boczkaj G, Jafari S M. The role of hydrodynamic cavitation in tuning physicochemical properties of food items: A comprehensive review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023

[10] Zheng H, Zheng Y, Zhu J. Recent developments in hydrodynamic cavitation reactors: cavitation mechanism, reactor design, and applications[J]. Engineering, 2022

[11] Guo Jiao. Study on the external characteristics and water disinfection application of rotating hydraulic cavitator[D]. Shandong:Shandong University, 2021 (郭姣. 旋转式水力空化器外特性及其水消毒应用研究 [D]. 山东:山东大学, 2021(in Chinese))

[12] Badve M P, Bhagat M N, Pandit A B. Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 151: 31−38

[13] Chen Le, Dong Zhiyong, Liu Chang, et al. Experimental study on hydraulic cavitation of square porous plate for killing Escherichia coli[J]. Journal of Hydroelectric Power Generation, 2016, 35(09): 48−54 (陈乐, 董志勇, 刘昶, 等. 方孔多孔板水力空化杀灭大肠杆菌的实验研究 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(09): 48−54(in Chinese))

[14] Sun Haosheng. Study on the degradation of alkaline organic dyes and heat generation by hydraulic cavitation with double parallel orifice plates[D]. Shenyang:Liaoning University, 2022 (孙浩胜. 双并联孔板水力空化降解碱性有机染料及产热的研究 [D]. 沈阳:辽宁大学, 2022(in chinese))

[15] Song Y, Hou R, Liu Z, et al. Cavitation characteristics analysis of a novel rotor-radial groove hydrodynamic cavitation reactor[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106028

[16] Li Hao. Research on cavitation characteristics of large vertical axial flow pumps and their impact on unit stability[D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2023 (李浩. 大型立式轴流泵空化特性及其对机组稳定性影响研究 [D]. 扬州:扬州大学, 2023(in Chinese))

[17] Zhou Zhongliang. Research on the influence of small blades in the front cover plate of centrifugal pump impeller on cavitation characteristics[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2021 (周忠亮. 离心泵叶轮前盖板小叶片对空化特性影响研究 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2022(in Chinese))

[18] Ji B, Luo X, Arndt R E A, et al. Numerical simulation of three dimensional cavitation shedding dynamics with special emphasis on cavitation–vortex interaction[J]. Ocean Engineering, 2014, 87: 64−77

[19] Chen Qi. Study on the unstable flow and cavitation characteristics of centrifugal pumps under low flow conditions[D]. Chengdu: Xihua University, 2022 (陈琪. 小流量工况离心泵不稳定流动及空化特性研究 [D]. 成都:西华大学, 2022(in Chinese))

[20] Wang Qianting, Wang Junyu, Zhang Kepeng, et al. Analysis of cavitation characteristics of typical cut-off throttle valves[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(08): 715−723 (王芊婷, 王均宇, 张克鹏, 等. 典型截止节流阀空化特性分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(08): 715−723(in Chinese))