

离心泵叶片吸力面粗糙带抑制空化效果研究

赵伟国<sup>1,2</sup> 李清华<sup>1</sup> 亢艳东<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 提出一种在叶片前缘吸力面布置粗糙带抑制空化的方法。选用低比转数离心泵作为研究对象,利用修正的 SST  $k-\omega$  湍流模型和 Kubota 空化模型对离心泵全流域进行空化数值模拟。通过对比不同空化数下有无粗糙带结构离心泵叶轮内的流场结构、湍动能分布、速度矢量、空泡体积变化和监测点压力脉动结果,分析粗糙带结构对离心泵工作性能的影响和空化抑制效果。结果表明:粗糙带结构对离心泵扬程和效率的影响较小,不会对离心泵工作性能造成较大影响;布置粗糙带后,叶轮内的流场分布得到改善,漩涡强度减弱,流动变得平稳;粗糙带结构有效抑制了空泡的初生,减弱了初生阶段湍流带来的能量耗散,对空化严重阶段的空泡体积也有一定的抑制效果;粗糙带结构对叶轮进口处、叶轮外缘和蜗壳隔舌处的主频压力振幅影响较小,对粗糙带结构之后且靠近该结构流域的压力脉动产生不同程度的扰动。

**关键词:** 离心泵; 粗糙带; 空化抑制; 数值模拟

中图分类号: TH311      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)06-0169-08

OSID:



Effect of Suppressing Cavitation of Rough Zone on Suction Surface of Centrifugal Pump Blade

ZHAO Weiguo<sup>1,2</sup> LI Qinghua<sup>1</sup> KANG Yandong<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A low specific speed centrifugal pump was selected as the research object, and a method of suppressing cavitation was proposed by arranging rough zone on the suction surface of the blade leading edge. The modified SST  $k-\omega$  turbulence model and Kubota cavitation model was applied to carry out cavitation numerical simulation on the whole flow area of the centrifugal pump. By comparing the flow field structure, turbulent kinetic energy distribution, velocity vector, cavitation volume change and pressure fluctuation of monitoring points in centrifugal pump impeller with and without rough zone structure under different cavitation numbers, the performance and cavitation suppression effect of rough zone structure on centrifugal pump were analyzed. The research results showed that the rough zone structure had little effect on the head and efficiency loss of the centrifugal pump, and it also did not have a great impact on the operation of the centrifugal pump. After the rough zone was arranged, the flow field distribution in the impeller was improved, the vortex intensity was weakened, and the flow became more stable. The rough zone structure effectively suppressed the initial formation of cavitation bubbles, reduced the energy dissipation caused by turbulence in the initial stage, and also had a certain inhibitory effect on the volume of the cavitation in the stage that cavitation bubbles had a great impact on the head of the centrifugal pump. Under different cavitation numbers, the rough zone structure had little effect on the main frequency pressure amplitude at the impeller inlet, the outer edge of the impeller and the volute separation tongue, and produced varying degrees of disturbance to the pressure pulsation behind the rough zone structure and close to the structure. The structure had certain reference significance for practical engineering applications.

**Key words:** centrifugal pump; rough zone; cavitation suppression; numerical simulation

收稿日期: 2020-08-06    修回日期: 2020-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0606103)和甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA149)

作者简介: 赵伟国(1979—),男,教授,主要从事水力机械优化设计及空化多相流动机理研究,E-mail: zhaowg@zju.edu.cn

0 引言

空化是液体流域中低压区域形成蒸汽空泡的过程,涉及到汽液间的相变,空化是常发生于流体机械中的复杂流动现象<sup>[1-2]</sup>。离心泵工作时,叶轮进口处会形成低压区域,叶片前缘吸力面附近开始产生空泡。空化发展到一定程度会降低泵的扬程、产生振动和噪声、破坏过流部件,导致泵运行和寿命受到影响<sup>[3-4]</sup>。

目前,离心泵叶轮内抑制空化的方法基本可以分为两类:一类是通过改变叶轮中的部分结构抑制空化,如通过优化叶轮几何形状提高空化性能<sup>[5]</sup>,通过改变叶片包角改善空化现象<sup>[6]</sup>,通过叶片开缝<sup>[7]</sup>、叶片开孔<sup>[8-9]</sup>和偏移平衡孔<sup>[10]</sup>等方式来抑制空化,通过在工作面布置障碍物<sup>[11]</sup>、加分流叶片<sup>[12]</sup>、布置长短交错叶片<sup>[13]</sup>等方式改善叶轮内流动状态,从而抑制空化;另一类是通过增加叶轮进口压力抑制空化,如在叶轮前加诱导轮可以改善离心泵的空化性能<sup>[14]</sup>,从离心泵出口引射吸水室可以有效提高离心泵的空化性能<sup>[15-16]</sup>。此外,射流技术对空化流动也有较好的控制效果<sup>[17]</sup>。

过流部件表面粗糙状况会影响流体的流动状态。文献[18]在翼型表面施加粗糙带,增大了近壁面流场湍动能,使转捩提前,提高了近壁面流场压力,抑制了空化初生的发生。文献[19]研究了叶轮内表面粗糙度对离心泵流动损失和流体波动状况的影响。文献[20]利用 Fluent 软件改变流域的粗糙度,进行离心泵性能数值模拟,结果表明:粗糙度对低比转数离心泵性能的数值预测结果影响较大,对高比转数离心泵性能的数值预测结果影响较小。文献[21]对离心泵汽液两相流进行定常空化数值模拟,结果表明:粗糙度增大,导致离心泵扬程和效率降低、轴功率增加,且粗糙度对空化的不同阶段都存在影响。

本文提出一种在离心泵叶片吸力面靠近前缘处布置粗糙带抑制空化的方法,通过数值模拟分析该粗糙带结构对离心泵叶轮内的空化发展、流场分布结构及压力脉动的影响。

1 计算模型与计算网格

1.1 计算模型

计算模型为一台比转数  $n_s=32$  的离心泵,设计参数为:流量  $Q_0=8.6\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H_0=4.2\text{ m}$ ,转速  $n=500\text{ r/min}$ 。叶轮进口直径  $D_j=90\text{ mm}$ ,叶轮出口直径  $D_2=310\text{ mm}$ ,叶轮出口宽度  $b_2=12\text{ mm}$ ,叶片进口角  $\beta_1=37^\circ$ ,叶片出口角  $\beta_2=37^\circ$ ,叶片数  $Z=6$ ,叶

片为圆柱叶片。  
计算域为离心泵全流域,包括进口段、叶轮流域、蜗壳流域、出口延长段和前后腔。计算域三维造型由商业建模软件 Pro/E 完成。  
本文提出的粗糙带布置在离心泵每个叶片吸力面靠近前缘处,距离叶片进口端  $2.4\text{ mm}$ ,粗糙带由 6 个横截面  $1\text{ mm}\times0.5\text{ mm}$  矩形的长方体相隔  $1\text{ mm}$  组成,布置范围为  $11\text{ mm}$ ,结构和布置位置如图 1 所示。

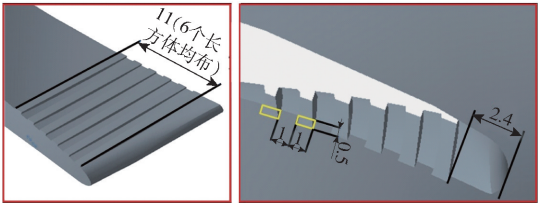
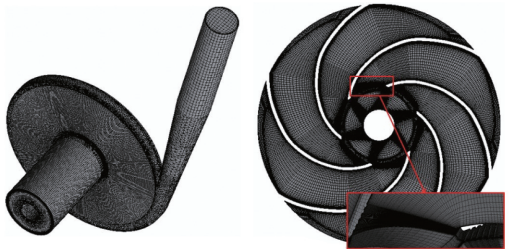


图 1 粗糙带结构布置图  
Fig. 1 Rough zone structure layout

1.2 网格划分及其无关性分析

通过 ICEM CFD 软件对离心泵全三维模型进行网格划分,如图 2 所示,其中叶轮流域和前后腔流域采用六面体网格,叶轮流域是空化发生区,需保证其计算精度,故采用质量较高的六面体网格,蜗壳不是研究重点,选择非结构网格也可满足模拟要求。



(a) 全流域网格 (b) 叶轮网格及粗糙带局部网格  
图 2 网格划分  
Fig. 2 Grid generation

为了提高模拟精度,需要对流域近壁面进行网格加密以保证有足够的节点数来捕捉边界层流动<sup>[22]</sup>,常用近壁面区域最近的网格单元节点到壁面间的距离  $Y^+$  值进行控制。

本文所采用的 SST  $k-\omega$  模型近壁区应用  $k-\omega$  模型,考虑到边界层网格的  $Y^+$  值范围,  $Y^+ \leq 100$  可以满足该湍流模型对近壁面网格质量要求<sup>[23]</sup>。本次模拟近壁面网格的  $Y^+$  值能够保证在离心泵流场模拟中具有较好的适用性。

选取 5 组不同密度的网格进行网格无关性分析,如表 1 所示。分析可知:随着网格数的不断增加,扬程会有微小的增加,其误差都在 1% 的允许范围内。综合考虑网格数量带来的计算周期和数值结果的准确可靠性,最终选用方案 3 进行详细的计算分析。

表 1 网格无关性验证

Tab.1 Check of grid independence

| 方案 | 计算域网格总数   | 扬程/m   |
|----|-----------|--------|
| 1  | 764 572   | 4. 493 |
| 2  | 1 052 132 | 4. 508 |
| 3  | 1 434 576 | 4. 512 |
| 4  | 1 705 412 | 4. 513 |
| 5  | 2 139 476 | 4. 513 |

2 数值模拟

2.1 控制方程

控制方程采用基于雷诺平均的纳维-斯托克斯方程。微分形式的方程为：  
连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \tag{2}$$

式中  $\rho$ ——混合相密度  $t$ ——时间  
 $u_i、u_j$ ——流体速度  $F_i$ ——质量力  
 $p$ ——压力  $\nu$ ——运动黏度  
 $x_i、x_j$ ——坐标分量

2.2 湍流模型

未修正的 SST  $k-\omega$  湍流模型会对空化流的流体粘性预测过高,导致空化泡难以脱落<sup>[24]</sup>。本文采用修正的 SST  $k-\omega$  湍流模型<sup>[25-26]</sup>,适当降低其模拟的流体粘性,以便更加准确地捕捉空化流的流动状态。通过修正密度函数  $f(\rho)$  来降低空化发生区域的湍流粘度,即

$$\mu_t = f(\rho_m) C_\mu \frac{k}{\omega} \tag{3}$$

其中  $f(\rho_m) = \rho_v + (1 - \alpha_v)^c (\rho_l - \rho_v)$  (4)

式中  $\mu_t$ ——湍流黏度  
 $\rho_m$ ——汽液混合相密度  
 $\alpha_v$ ——汽相体积分数  
 $\rho_l$ ——液相密度  $\rho_v$ ——汽相密度  
 $C_\mu$ ——粘性系数,通常取 1  
 $k$ ——湍动能  $\omega$ ——耗散率

$c$  为常数, $c$  取  $10^{[26]}$  可以有效降低汽液两相的湍流粘性系数,更好地模拟离心泵叶轮流域内的空泡流。

2.3 空化模型

数值模拟选用 Kubota 空化模型<sup>[27]</sup>,该空化模型忽略了表面张力项及二阶时间导数项,假定流体域内的气核密度为常数,着重考虑了空化初生和发展时空泡半径变化的影响,适于模拟离心泵内的空

化及空泡的生长和破灭。Kubota 空化模型是基于输运方程,即

$$\frac{\partial (\rho_m f_v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i f_v)}{\partial x_i} = R_e - R_c \tag{5}$$

其中

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc} (1 - \alpha_v) \rho_v}{r_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \tag{6}$$

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{r_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \tag{7}$$

式中  $f_v$ ——汽相质量分数  
 $r_b$ ——气泡半径  
 $\alpha_{nuc}$ ——汽核的体积分数  
 $p_v$ ——饱和蒸汽压力  
 $F_{vap}$ ——蒸发系数  
 $F_{cond}$ ——凝结系数

根据研究者的研究经验<sup>[28]</sup>,  $F_{vap} = 50$ ;  $F_{cond} = 0.01$ ;  $r_b = 1 \times 10^{-6}$  m;  $\alpha_{nuc} = 0.05\%$ 。

2.4 边界条件

本文采用商业计算软件 ANSYS CFX 进行数值计算。主要的边界条件设定如下:计算域入口设置为总压进口,出口设置为质量流量出口,叶轮流域设置为旋转域,其他流域均为静止域。前后腔流域中与叶轮接触的壁面设置成旋转壁面,其余壁面均设为无滑移壁面。进口流域和叶轮流域的交界面以及叶轮流域和蜗壳流域的交界面定常计算时设置为冻结转子,非定常计算时设置为瞬态冻结转子。求解过程中控制方程的对流离散型采用二阶高精度格式,时间项离散格式为二阶后向欧拉差分格式。空化模拟的汽液两相分别为 25℃ 的蒸汽和 25℃ 的纯水。空化临界压力设置为 25℃ 纯水时的饱和蒸汽压力 3 169 Pa。

2.5 计算过程说明

先进行定常空化计算,然后以收敛的定常计算结果作为非定常空化计算的初始场,定常计算的时间步长  $\Delta t$  取 0.002 s。非定常计算中的时间步长  $\Delta t$  取 0.001 s,总时长为 0.48 s,即叶轮共旋转 4 圈。将最大残差作为求解收敛的判别标准,收敛精度设置为  $10^{-6}$ 。非定常计算得到的第 4 个周期结果呈现出在较小的范围内波动的稳定特征,故本文取第 4 个旋转周期的计算结果进行非定常特性分析。

3 结果与分析

3.1 数值模拟验证

为了验证数值模拟的准确性,在兰州理工大学离心泵封闭式试验台对原型离心泵分别进行离心泵外特性和空化特性试验。试验系统如图 3 所示。

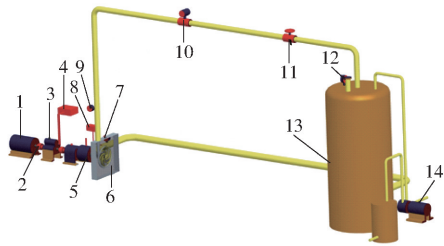


图3 离心泵闭式试验台示意图

Fig. 3 Sketch of centrifugal pump closed test bench

1. 电机 2. 联轴器 3. 扭矩仪 4. 变频器 5. 稳流罐 6. 可视化离心泵 7. 进口压力表 8. 压力脉动监测装置 9. 出口压力表 10. 电磁流量计 11. 出口阀门 12. 真空表 13. 汽蚀罐 14. 水环真空泵

3.1.1 外特性试验与数值模拟对比

试验记录了原型离心泵在  $0.4Q_0 \sim 1.3Q_0$  ( $Q_0$  为试验流量) 的 10 个流量点下的进出口压力、转速及扭矩,经计算得到原型离心泵在不同流量工况下的扬程和效率,然后与数值计算的扬程和效率结果进行对比。

从图 4 可知:原型泵的扬程模拟值曲线与试验值曲线变化趋势一致,模拟值与试验值最大误差在  $Q/Q_0=0.7$  处,其误差为 4.8%,符合误差要求;在各个工况下,效率模拟值都略高于效率试验值,这是由于数值模拟并未考虑流道的表面粗糙度、加工误差和试验精度等因素。效率模拟值与试验值的最大误差为 4.7%,也在误差范围内。综上,通过试验验证了数值模拟的准确性。

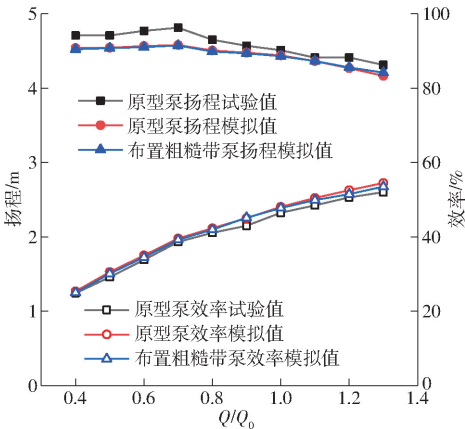


图4 外特性曲线

Fig. 4 External characteristic curves

布置粗糙带的离心泵,其扬程和效率模拟值与原型泵扬程模拟值曲线走势一样,各个工况下其扬程和效率的模拟值略低于原型泵,相对误差在 1.0% 内,说明粗糙带的引入,并没有造成过大的扬程下降和效率损失。

3.1.2 空化特性试验与数值模拟对比

空化特性试验,保持流量恒定不变,通过操作真空泵调节进口真空度来降低泵进口压力,从而使离

心泵内发生空化。试验结果与数值计算结果进行对比,空化特性曲线如图 5 所示。

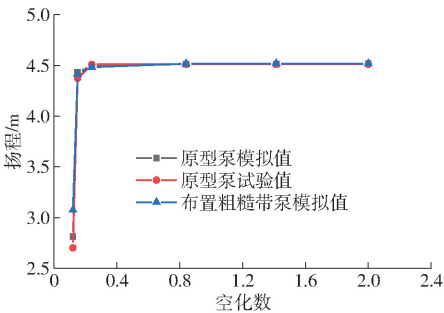


图5 空化特性曲线

Fig. 5 Cavitation characteristic curves

从图 5 可得:原型泵空化性能曲线的数值模拟结果与试验结果较为一致。同一空化数下,原型泵的扬程模拟值比试验值略高一些,最大相对误差为 4.1%,验证了空化模拟的准确性。叶轮布置粗糙带后,提高了断裂扬程,从原型泵的断裂扬程 2.80 m 提高到 3.07 m,提高 9.6%。其他空化数下,对扬程的影响较小。

3.2 离心泵内部流场特性分析

3.2.1 粗糙带对流场结构的影响

图 6 为不同空化数下原型泵和布置粗糙带的离心泵的叶轮中间截面液相流线和空泡体积分数等值面 ( $\alpha_v=10\%$ ) 分布。分析可知:在空化数  $\sigma=0.84$  时,此时为空化初生阶段,流线分布较为均匀,空泡在叶片前缘吸力面处出现。随着空化数的减小,叶轮内空泡向叶轮出口方向发展,漩涡的强度增大,流动也变得更加紊乱。布置粗糙带后,在各个空化数下的叶轮内的漩涡范围和强度都比原型泵小,流动比原型泵叶轮内变得更加平稳。这是由于粗糙带结构的引入,改善了周围流场的流动状态。粗糙带结构对空泡形态的影响较小。

3.2.2 粗糙带对湍动能分布的影响

湍动能反映了能量的耗散程度,湍动能越大,流动的损失也越大。图 7 为不同空化数下叶轮中间截面的湍动能分布。由图可知:湍动能在叶轮进口和叶轮与蜗壳交接处区域存在较高值,尤其是叶轮靠近蜗壳隔舌处,说明该区域存在较大的能量损失;随着空化数的减小,湍动能较高值区域逐渐从叶轮进口向叶轮出口端靠近,并且叶轮与蜗壳交接处区域的湍动能增大,湍流加强,流动恶化,能量耗散变大。叶轮布置粗糙带后,在空化初生阶段,降低了湍动能;在  $\sigma=0.24$  和  $\sigma=0.15$  时,与原型泵的湍动能相比差别不大,但是改变了部分湍动能较高区域的分布情况。

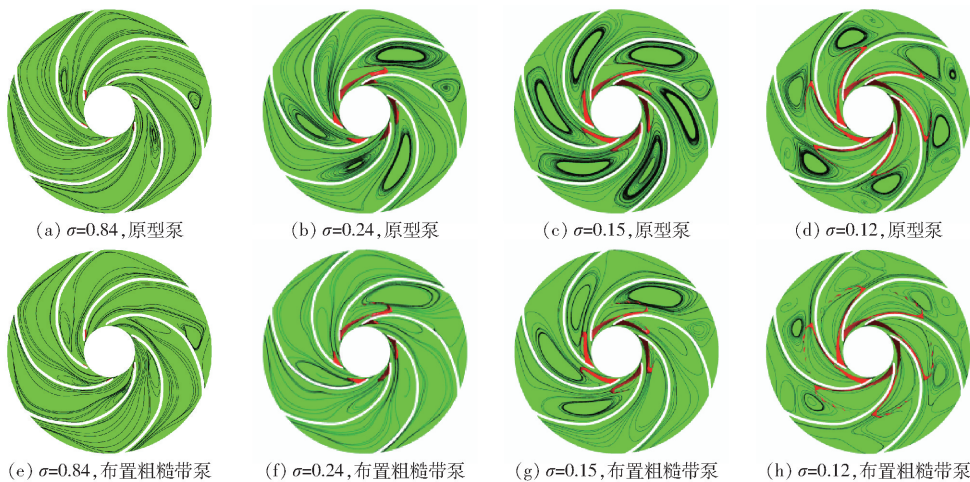


图6 叶轮中间截面液相流线和空泡体积分数等值面分布图

Fig. 6 Distributions of liquid streamlines and cavity volume fraction isosurfaces in middle section of impeller

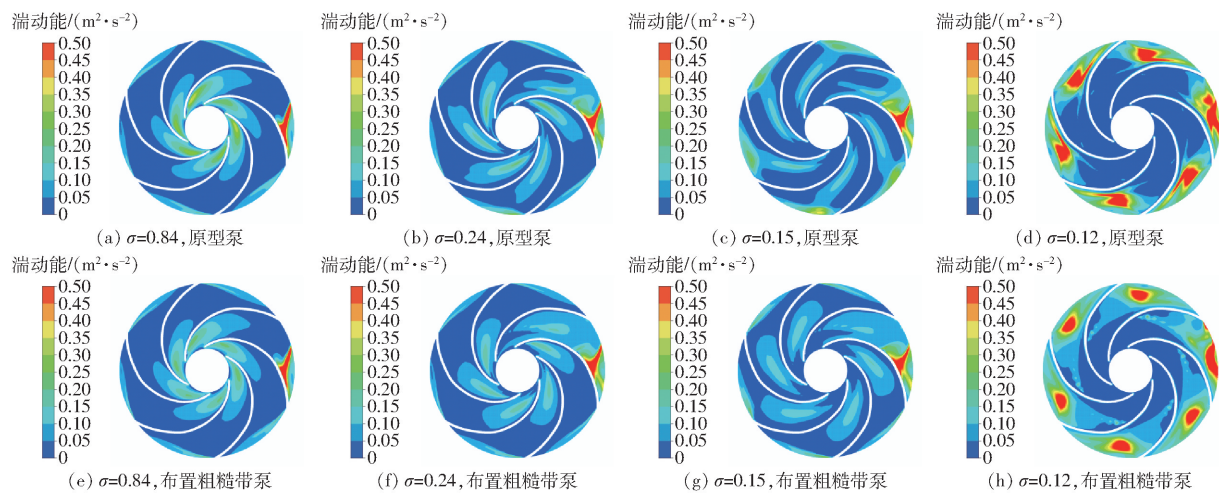


图7 叶轮中间截面湍动能分布

Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution in middle section of impeller

3.2.3 粗糙带对速度矢量和空泡体积的影响  
叶轮内空泡体积定义为

$$V_{cav} = \sum_{i=1}^N \alpha_{v,i} V_i \tag{8}$$

式中  $N$ ——计算域中控制单元总数量  
 $\alpha_{v,i}$ ——控制单元  $i$  中的蒸汽体积分数  
 $V_i$ ——控制单元  $i$  体积

图8和图9分别为最后一个周期内叶轮中间部分截面速度矢量和叶轮内空泡体积分布情况。在空化数  $\sigma = 0.84$  下,布置粗糙带泵叶轮内的空泡体积为原型泵叶轮内的空泡体积的21%,说明粗糙带结构有效地抑制了空泡的初生。由图8a和图8b可知:粗糙带的引入改变了周围的速度矢量分布,引起局部的低压区域变小,空泡体积得以有效控制;随着空化数的减小,当空化数  $\sigma = 0.24$  时,无论是原型泵和布置粗糙带泵,叶轮内空泡体积大幅增长。与原型泵相比,布置粗糙带泵叶轮内空泡体积明显变小,在该阶段,粗糙带结构对空化也有较好的抑制作

用。这是因为粗糙带结构减慢了周围的速度,紧靠叶片吸力面的回射流向叶片前缘处发展,致使低压区域减小,空泡体积变小;在空化数  $\sigma = 0.15$  下,叶轮内空泡体积继续增长,布置粗糙带泵叶轮内的空泡体积比原型泵叶轮内的空泡体积略微大一些。在此阶段,粗糙带对空泡体积没有起到抑制效果。如图8e和图8f中标记可观察出:与原型泵相比,粗糙带结构带来的空泡体积增大,主要在叶轮流域中间部分。这是因为粗糙带结构使这部分区域的液相水的速度加快,导致局部压力变低,增加了空泡体积;空化数继续降低,在空化数  $\sigma = 0.12$  时,此阶段空化已经发展到扬程断裂的程度,空泡体积随时间变化较小,并且布置粗糙带泵叶轮内的空泡体积时间均值比原型泵降低2.7%左右,粗糙带对空泡体积有一定的抑制效果。从图8g和图8h可知:在叶片工作面附近,布置粗糙带泵的流体速度小于原型泵的流体速度,布置粗糙带泵该处的局部压力大于原型泵,这就抑制了空泡体积的增长。

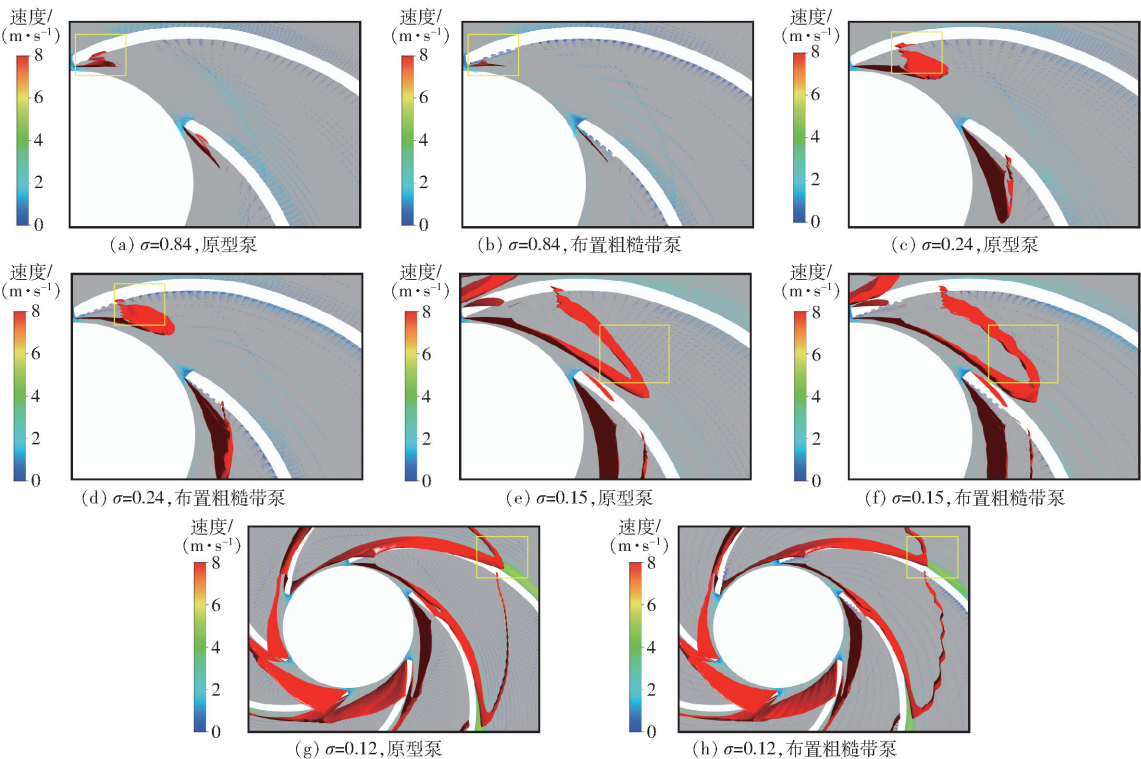


图 8 叶轮中间截面部分速度矢量和空泡体积分数等值面分布图

Fig. 8 Velocity vector distribution and cavity volume fraction isosurfaces in middle section of impeller

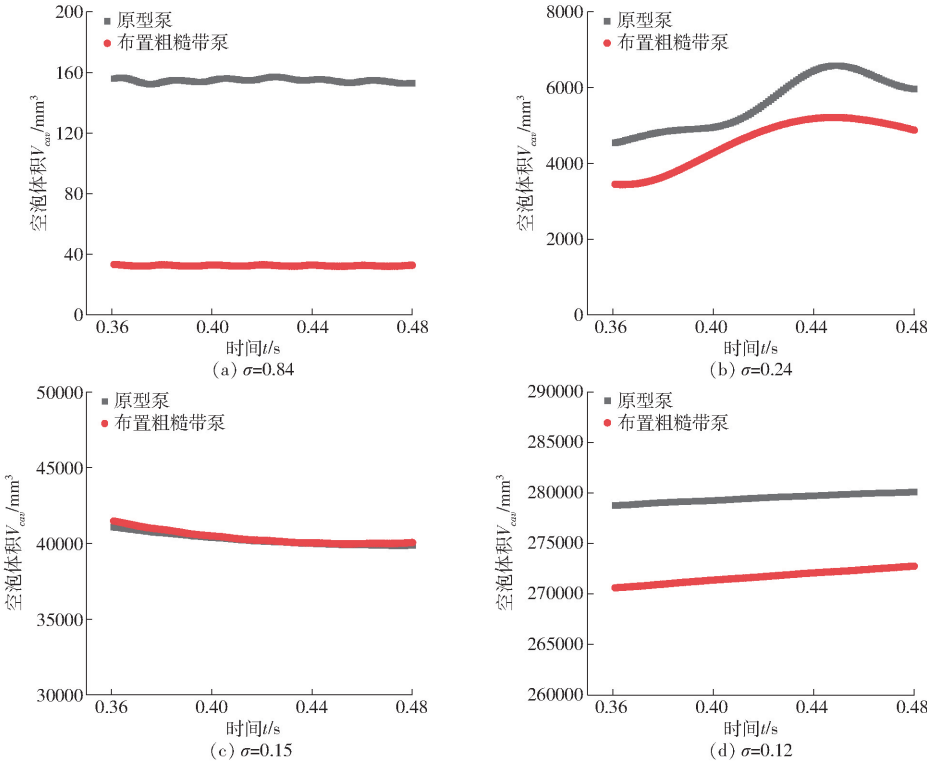


图 9 一个周期内叶轮内空泡体积变化

Fig. 9 Cavity volume change in impeller in one cycle

3.2.4 粗糙带对监测点压力脉动的影响

绝对压力脉动监测点设置如图 10 所示。Y1、Y2、Y3 和 Y4 在叶轮中间截面处,是叶轮流道内的监测点;V5 在蜗壳中间截面处,为蜗壳隔舌处的监测点。

图 11 是对监测点的绝对压力进行快速傅里叶变化得到的频域图。通过计算得到轴频为 8.33 Hz,叶片通过频率为 50 Hz。由图 11 可知,叶片通过频率是压力脉动的主频,对离心泵内部瞬态特性影响最大,故主要对主频进行分析。

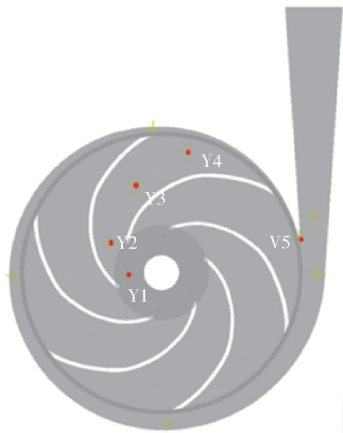


图 10 绝对压力脉动监测点

Fig. 10 Absolute pressure monitoring point

对于监测点 Y1,粗糙带结构对其主频振幅的影响较弱。随着空化数的减小,主频振幅越来越小。这是由于点 Y1 在粗糙带结构之前的叶轮进口处,

粗糙带不会影响到粗糙带结构前流场的压力脉动。随着空化数的减小,空泡从叶片前缘向出口发展,监测点 Y1 已处于空泡区域,压力脉动因此减弱;监测点 Y2 在空化数  $\sigma = 0.24$  时主频振幅达到最大值,粗糙带结构略微增加了其脉动幅值,其他空化数下影响较小;对于监测点 Y3,粗糙带在空化数  $\sigma = 0.84$  和  $\sigma = 0.24$  时,减弱了其主频压力脉动。在空化数  $\sigma = 0.15$  和  $\sigma = 0.12$ ,粗糙带增大了其主频幅值,这是由于粗糙带结构使得监测点 Y3 正处于空泡溃灭严重处,压力波动加大;在各个空化数下,粗糙带结构对监测点 Y4 和 V5 的主频振幅影响较小,这是因为 Y4 和 V5 分别在叶轮外缘和蜗壳隔舌处,压力相对较高。粗糙带结构引起的流场内的压力变化相比起该处本身的压力较小,不足以引起较大压力脉动。

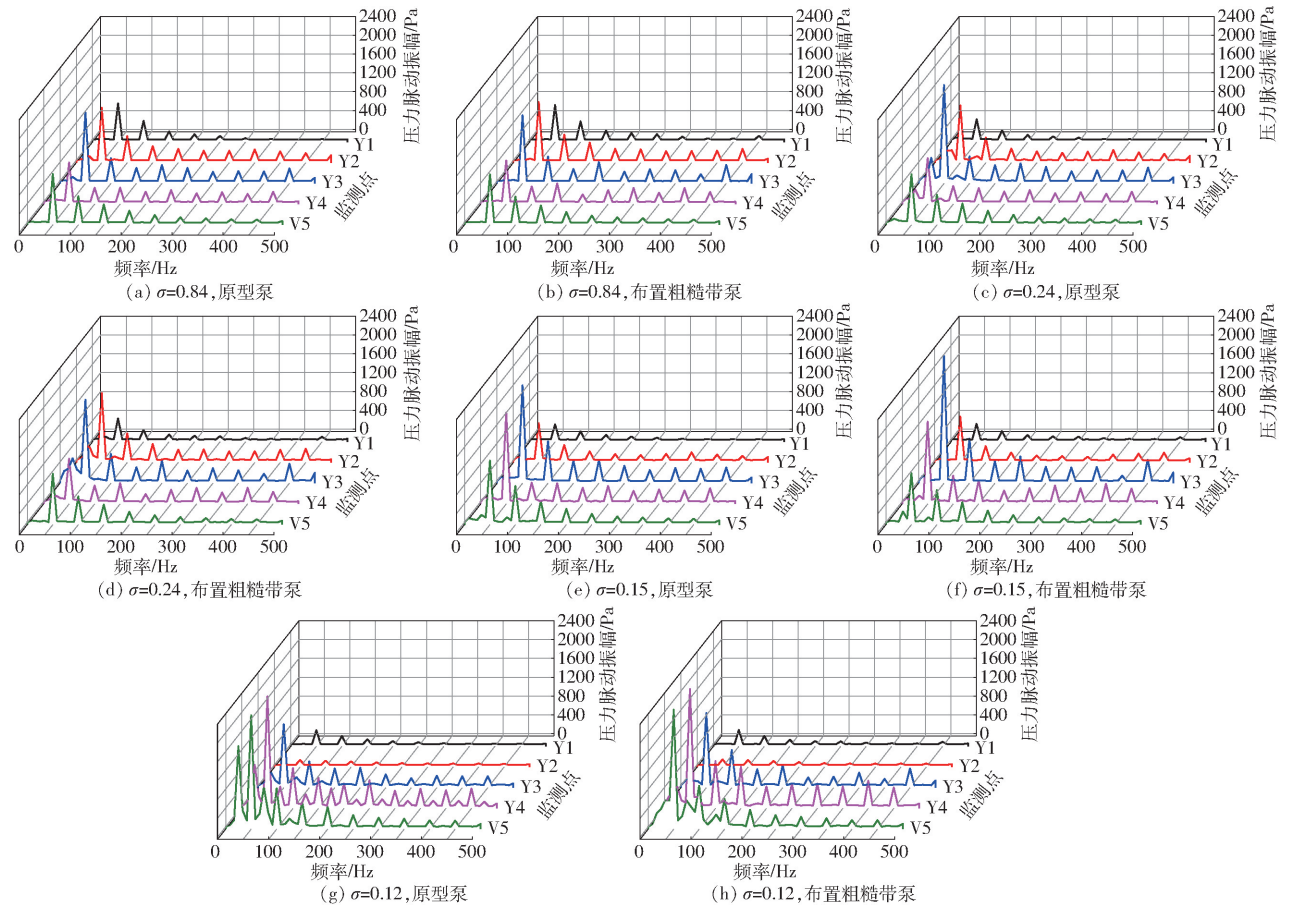


图 11 不同空化数下监测点压力脉动频域

Fig. 11 Pressure pulsation frequency domains at monitoring points under different cavitation numbers

4 结论

(1)引入粗糙带结构,离心泵扬程和效率略有下降,与原型泵的相对误差均在 1.0% 以内,对泵工作性能没有造成太大的影响,并且粗糙带将泵的断裂扬程提高了 9.6%。

(2)在不同的空化阶段,粗糙带结构均能改善叶轮内的流场分布,减弱了漩涡的强度,流动变得平稳;与原型泵相比,粗糙带可以减弱空化初生阶段的湍流能量耗散,改变空化高端动能区域的分布情况。

(3)粗糙带结构可以有效抑制空化初生阶段

( $\sigma=0.84$ )空泡的产生;在空化发展到空化数 $\sigma=0.24$ 时,对空化也有较好的效果;在空化数为 $\sigma=0.15$ 时,小幅加剧了空泡的发展,对空化没有抑制作用;在空化严重阶段( $\sigma=0.12$ ),对空化的抑制效果较小。

(4)在不同空化数下,粗糙带对叶轮进口处

(Y3)、叶轮外缘(Y4)和蜗壳隔舌(V5)处的主频压力振幅影响较小,对粗糙带结构之后且靠近该结构流域(Y2和Y3)压力脉动产生不同程度的影响。其中:在空化数 $\sigma=0.24$ 时,粗糙带略微增加了Y2的主频振幅;在空化数 $\sigma=0.15$ 和 $\sigma=0.12$ 时,粗糙带略微增大了Y3的主频振幅。

## 参 考 文 献

- [1] 潘森森,彭晓星.空化机理[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [2] 潘中永,袁寿其.泵空化基础[M].镇江:江苏大学出版社,2013.
- [3] JOE A. Centrifugal pumps: avoiding cavitation[J]. World Pumps, 2011(7-8): 34-39.
- [4] 宋启策,赵伟国,杨军虎,等.泵空化现象的研究综述[J]. 机械制造, 2014, 52(9): 1-5.  
SONG Qice, ZHAO Weiguo, YANG Junhu, et al. Summary of pump cavitation[J]. Machinery, 2014, 52(9): 1-5. (in Chinese)
- [5] 罗先武,张瑶,彭俊奇,等.叶轮进口几何参数对离心泵空化性能的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(5): 836-839.  
LUO Xianwu, ZHANG Yao, PENG Junqi, et al. Effect of impeller inlet geometry on centrifugal pump cavitation performance[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(5): 836-839. (in Chinese)
- [6] 牟介刚,施郑赞,谷云庆,等.叶片包角对离心泵空化性能的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(1): 24-28.  
MOU Jiegang, SHI Zhengzan, GU Yunqing, et al. Influence of blade wrap angle on cavitation performance of centrifugal pump[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47(1): 24-28. (in Chinese)
- [7] 王洋,谢山峰,王维军.开缝叶片低比转数离心泵空化性能的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(3): 210-215.  
WANG Yang, XIE Shanfeng, WANG Weijun. Numerical simulation of cavitation performance of low specific speed centrifugal pump with slotted blades[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(3): 210-215. (in Chinese)
- [8] 胡赞熬,王俊雄,祝宝山,等.离心泵叶轮穿孔对空化性能的影响[J]. 热能动力工程, 2018, 33(10): 44-51.  
HU Zan'ao, WANG Junxiong, ZHU Baoshan, et al. Effect of blade perforation on centrifugal pump cavitation characteristics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(10): 44-51. (in Chinese)
- [9] 赵伟国,潘绪伟,芦维强,等.叶片进口边穿孔前后的离心泵不稳定空化特性[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(5): 55-61.  
ZHAO Weiguo, PAN Xuwei, LU Weiqiang, et al. Instable cavitation characteristics of centrifugal pump before and after blade perforation at its inlet edge[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(5): 55-61. (in Chinese)
- [10] 王东伟,刘在伦,赵伟国.基于平衡孔偏移的离心泵空化性能改善研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 142-150.  
WANG Dongwei, LIU Zailun, ZHAO Weiguo. Improvement of cavitation characteristics of centrifugal pump by balanced hole offset[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 142-150. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200515&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200515&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.015. (in Chinese)
- [11] ZHAO Weiguo, ZHAO Guoshou. An active method to control cavitation in a centrifugal pump by obstacles[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(11): 1-15.
- [12] 赵伟国,咸丽霞,赵国寿,等.分流叶片对离心泵空化性能影响的数值预报[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(4): 52-62.  
ZHAO Weiguo, XIAN Lixia, ZHAO Guoshou, et al. Numerical prediction of the influence of flow-splitting blades on cavitation performance of centrifugal pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(4): 52-62. (in Chinese)
- [13] 牟介刚,施郑赞,谷云庆,等.长短交错叶片对离心泵空蚀特性的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(3): 593-602.  
MOU Jiegang, SHI Zhengzan, GU Yunqing, et al. Numerical simulation of cavitation erosion in centrifugal pump impeller with long-short staggered blade[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(3): 593-602. (in Chinese)
- [14] 郭晓梅,朱祖超,崔宝玲,等.诱导轮内流场数值计算及汽蚀特性分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 122-127.  
GUO Xiaomei, ZHU Zuchao, CUI Baoling, et al. Analysis of cavitation and flow computation of inducer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 122-127. (in Chinese)
- [15] 牟介刚,王荣,谷云庆,等.引射吸水室对离心泵性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 755-762.  
MOU Jiegang, WANG Rong, GU Yunqing, et al. Influence of jetting suction chamber on performance of centrifugal pumps[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 755-762. (in Chinese)
- [16] 朱凯程.引射离心泵内部流动和空化特性研究[D].杭州:浙江理工大学,2019.
- [17] 王巍,安昭阳,唐滔,等.射流控制水翼空化流动的多工况适应性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 186-194.  
WANG Wei, AN Zhaoyang, TANG Tao, et al. Adaptability of cavitation flow controlled by active jet under multi-cavitation conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 186-194. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20201021&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201021&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.021. (in Chinese)
- [18] 戴月进,张媛媛,黄典贵.水翼表面粗糙带对空化抑制效果的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(5): 770-773.  
DAI Yuejin, ZHANG Yuanyuan, HUANG Diangui. Numerical study of the impact of hydrofoil surface roughness on cavitation suppression[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(5): 770-773. (in Chinese)

- features of polarimetric SAR[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(8): 183 – 189. (in Chinese)
- [26] 侯蒙京, 殷建鹏, 葛静, 等. 基于随机森林的高寒湿地地区土地覆盖遥感分类方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 220 – 227.  
HOU Mengjing, YIN Jianpeng, GE Jing, et al. Land cover remote sensing classification method of alpine wetland region based on random forest algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 220 – 227. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200725&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200725&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.025. (in Chinese)
- [27] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 421 – 431.  
MA Enpu, CAI Jianming, LIN Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of tele-coupling[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 421 – 431. (in Chinese)
- [28] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 255 – 262.  
SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 255 – 262. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190128&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
- [29] 石小伟, 冯广京, YI Yang, 等. 浙中城市群土地利用格局时空演变特征与生态风险评价[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 242 – 251.  
SHI Xiaowei, FENG Guangjing, YI Yang, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and ecological risk assessment of land use landscape patterns in central Zhejiang urban agglomeration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 242 – 251. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200527&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200527&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.027. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 176 页)

- [19] 赵斌娟, 王瑜, 陈汇龙, 等. 离心泵尾流-射流现象及粗糙度对其影响的分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 138 – 142.  
ZHAO Binjuan, WANG Yu, CHEN Huilong, et al. Jet – wake flow in the channel of impeller and the effect of surface roughness on it[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 138 – 142. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140923&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140923&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.023. (in Chinese)
- [20] 谈明高, 刘厚林, 吴贤芳, 等. 粗糙度对离心泵性能数值预测的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 131 – 134.  
TAN Minggao, LIU Houlin, WU Xianfang, et al. The effect of roughness on the numerical prediction of the characteristics of centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 131 – 134. (in Chinese)
- [21] 徐维晖, 侯晓, 胡孟, 等. 粗糙度对离心泵空化过程的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(3): 197 – 203.  
XU Weihui, HOU Xiao, HU Meng, et al. Impact of wall roughness on cavitating process in centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(3): 197 – 203. (in Chinese)
- [22] JI Bin, LUO Xianwu, WANG Xin, et al. Unsteady numerical simulation of cavitating turbulent flow around a highly skewed model marine propeller[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 0111022.
- [23] 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 67 – 72.  
LI Xiaojun, YUAN Shouqi, PAN Zhongyong, et al. Realization and application evaluation of near-wall mesh in centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 67 – 72. (in Chinese)
- [24] 郑小波, 刘莉莉, 郭鹏程, 等. 基于不同空化模型 NACA66 水翼三维空化特性数值研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2018, 33(2): 199 – 206.  
ZHENG Xiaobo, LIU Lili, GUO Pengcheng, et al. Numerical investigation of three-dimensional cavitating performance of NACA66 hydrofoil base on different cavitation models[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(2): 199 – 206. (in Chinese)
- [25] REBOUD J L, STUTZ B, COUTIER O. Two-phase flow structure of cavitation: experiment and modeling of unsteady effects[C] // Proceedings of the Third Symposium on Cavitation, Grenoble, 1998.
- [26] 赵伟国. 水翼云空化及其抑制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [27] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C] // Proc. of Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, 2004: 152.
- [28] JI B, LUO X, WU Y, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 51: 33 – 43.