Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi: 10. 3969/j. issn. 1674 - 8530. 15. 0238



口环间隙对诱导轮离心泵空化流动和 性能的影响



肖丽倩

第8期

No. 8

第 34 卷

Vol. 34

肖丽倩¹,黎义斌¹²,刘宜¹²,毕祯¹,赵伟国¹²

2016 年 8 月

Aug. 2016

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

摘要:为了研究口环间隙对前置诱导轮离心泵空化性能的影响,基于 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型和 Rayleigh – Plesset 方程均相流空化模型,以前置诱导轮离心泵为研究对象,选取口环间隙为 0.15 0.25 0.40 和 0.60 mm 这4 种方案对其进行空化流动数值计算,并与试验结果对比分析. 研究结果表明,口环间隙大小对诱导轮离心泵的外特性和空化性能影响较大,随着口环间隙的 增大,总扬程效率和叶轮扬程效率均减小,与口环间隙为 0.15 mm 时相比,总扬程效率和叶轮扬程效率均减小,与口环间隙为 0.15 mm 时相比,总扬程效率和叶轮扬程效率均消大,分别增大了 29.86% 和 28.40%.另外,随着口环间隙的增大,空化性能曲线出现波动现象,间隙越大,波动越明显;离心泵主叶轮工作面靠近前盖板出现云状空泡分布,空化不稳定,间隙越大,空化越不稳定,临界空化数越大.经分析,引起空化不稳定性的因素可能有:口环间隙出口处泄漏高压流体对主流的冲击;口环附近空化的发生以及诱导轮空化引起叶片出口液流角的变化.

关键词: 诱导轮离心泵;口环间隙;外特性;空化性能;数值模拟 中图分类号: TH311 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2016)08-0657-08

肖丽倩,黎义斌,刘宜,等. 口环间隙对诱导轮离心泵空化流动和性能的影响[J]. 排灌机械工程学报 2016 34(8):657-664 671. XIAO Liqian, LI Yibin, LIU Yi, et al. Effect of wear-ring clearance on cavitation flow and performance of centrifugal pump with inducer[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016 34(8):657-664 671. (in Chinese)

Effect of wear-ring clearance on cavitation flow and performance of centrifugal pump with inducer

XIAO Liqian¹, LI Yibin^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, BI Zhen¹, ZHAO Weiguo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou , Gansu 730050 , China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems , Lanzhou , Gansu 730050 , China)

Abstract: In order to investigate the effect of wear-ring clearance on the cavitation performance of the centrifugal pump with the pre-positioned inducer, the cavitation flow and performance in the centrifugal pump with the pre-positioned inducer were numerical simulated with four different projects which were 0. 15 ρ . 25 ρ . 40 and 0. 60 mm based on the RNG $k - \varepsilon$ turbulent model combined with Rayleigh – Plesset Homogeneous cavitation model and compared with experimental results. The results show that the size of the wear-ring clearance has a greater influence on the external performance and cavitation performance; with the increasing of the wear-ring clearance , compared with 0. 15 mm , the total head

黎义斌(1977—) 男,甘肃临洮人 副教授,博士(通信作者,liyibin58@163.com),主要从事流体机械内部流动特性研究.

收稿日期: 2015-11-02; 网络出版时间: 2016-07-11

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160711.0822.012.html

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51369015);甘肃省科技计划项目(145RJZA047)

作者简介: 肖丽倩(1990—) 女,甘肃景泰人,硕士研究生(xlq0214@163.com),主要从事流体机械内部流动特性研究.

efficiency and the head efficiency of the impeller decrease , the changes of the head are up to 0. 60% and 4. 21% , and the changes of the efficiency are up to 6. 50% and 9. 32%. Moreover , the head and efficiency of the inducer increase , and they are up to 29. 86% and 28. 40%. The cavitation curves wave with the increasing of the wear-ring clearance and the decreasing of the cavitation number , and the wider the clearance is , the more obvious the flactuation is. The cloudy cavitation bubbles are distributed on the pressure surface that is close to the front shroud , which causes cavitation instability , and the wider the clearance is , the more the cavitation is the greater the critical cavitation number is. It is found that the factors that influence the cavitation instability of the pump are possibly related to the impact of leakage high-pressure fluid of the wear-ring clearance outlet and the change of the outlet flow angel caused by cavitating in the pre-positioned inducer.

Key words: centrifugal pump with inducer; wear-ring clearance; external performance; cavitation performance; numerical simulation

离心泵在运行时,当过流部件的局部压力下降 到当时温度的汽化压力时,气泡从液体中析出,这 些气泡随着主流一起运动,遇到高压流体后迅速溃 灭,对过流部件壁面产生巨大的冲击力,引起表面 的腐蚀破坏,离心泵的效率、扬程等性能参数因此 受到影响.因此,空化性能的好坏决定了离心泵能 否安全稳定运行,为此,国内外学者在提高离心泵 空化性能方面做了很多研究.

罗先武等^[1]、刘宜等^[2]认为适当地延伸叶轮叶 片的进口边位置、加大叶片进口角以及选取适当的 叶轮进口直径均可较明显地改变离心泵的空化性 能; 张永学等^[3] 在离心泵前加装预旋装置,通过调 节预旋角度提高汽蚀性能. 然而,这些方法对汽蚀 性能的改善都十分有限,目前在离心泵进口前加装 诱导轮是最有效的措施之一,诱导轮不仅能够满足 叶轮进口的能量要求,而且对离心泵扬程和效率影 响不大^[4-5]. HASSAN 等^[6] 用 X 射线技术研究了涡 轮泵诱导轮内气泡体积分数分布规律;李晓俊等^[7] 分析了诱导轮离心泵空化条件下扬程和效率的下 降规律;郭晓梅等^[8-10]就前置不同结构的诱导轮对 离心泵空化性能的影响进行了研究. 但是都未考虑 口环间隙的影响,口环间隙的改变影响离心泵的外 特性,而且主要集中在前后腔体及间隙出口 处[11-12]. 黄先北等[13] 进行了空化条件下的非定常 数值计算,预测口环间隙附近的空化现象.目前有 关口环间隙对诱导轮离心泵性能影响方面的研究 较少.

文中以某前置等螺距诱导轮离心泵为研究对 象 基于 CFD 技术对不同口环间隙下的诱导轮离心 泵进行空化数值计算,揭示口环间隙值对诱导轮及 其离心泵叶轮空化性能的影响.

1 研究对象和网格划分

1.1 诱导轮离心泵额定参数

所选诱导轮离心泵额定工况的设计参数为流 量 $Q = 105 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 H = 36 m,转速 n = 1 420 r/min. 几何参数为主叶轮进口直径 $D_1 = 150 \text{ mm}$,出 口直径 $D_2 = 350 \text{ mm}$,出口宽度 $b'_2 = 20.1 \text{ mm}$,叶片数 Z = 6,诱导轮轮缘直径 $D_1 = 150 \text{ mm}$,轮毂直径 $d_h =$ 60 mm,导程 S = 139 mm,叶片数 $Z_i = 3$,叶片厚度 $\delta = 2 \text{ mm}$.

离心泵和前置诱导轮位置匹配关系如图 1 所 示 因为只考虑前口环间隙对空化性能的影响,所 以其结构包括进水段、诱导轮、前口环、叶轮、蜗壳 和出水段,建立三维模型时,考虑到诱导轮和离心 泵叶轮周向相对安放位置对外特性和空化性能的 影响 根据前期的计算将相对安放角度取为 5°.分 别取口环间隙 $b_1 = 0.15 \text{ mm}, b_2 = 0.25 \text{ mm}, b_3 = 0.40 \text{ mm} b_4 = 0.60 \text{ mm} 这4 种方案进行诱导轮离心$ 泵的全流道空化数值计算.





1.2 网格划分

将计算模型导入 CFD 前处理软件中进行流域 部分的网格划分,计算部分网格如图2所示.诱导 轮、叶轮及蜗壳部分流道复杂,采用对几何模型适 用性非常好的非结构四面体网格进行划分,口环间 隙的网格采用六面体结构化网格 此间隙处网格与 蜗壳前腔处的网格尺寸大小相当.进水段采用六面 体结构网格可减少网格数,节省计算时间.诱导轮 离心泵的核心部件在于叶轮部分和蜗壳部分 进水 段和出水段的影响较小,文中将对核心部件及口环 间隙进行网格无关性分析,因为诱导轮、离心叶轮 和蜗壳均为非结构四面体网格 ,所以只控制整体网 格密度即可控制网格总数,诱导轮叶片进口边和叶 轮叶片进口边进行局部加密 ,口环间隙处可通过控 制周向和径向(厚度)方向的节点数来控制网格数. 在额定工况点 $U_{b_3} = 0.40 \text{ mm}$ 为基准进行网格无 关性分析 首先确定1套基准网格 在此基础上分别 减小和增大核心部件的网格数,当网格数大于288 万时 诱导轮离心泵的总扬程和效率计算值的偏差 很小 最终确定网格数为2 881 735 其中诱导轮、叶 轮和口环间隙的网格数分别为 817 692,756 255, 75 992.



图 2 模型泵部分网格示意图 Fig. 2 Part meshes of model

2 数值计算方法

2.1 控制方程

诱导轮离心泵内部流动为三维不可压黏性湍 流流动,控制方程为连续性方程和雷诺时均 N – S 方程,湍流模型选用能够较好地处理高应变率及流 线弯曲程度较大流动的 RNG $k - \varepsilon$ 模型^[14].采用有 限体积法对控制方程进行离散,采用高阶求解(high resolution) 差分格式,收敛精度为 10⁻⁴,通过监测扬 程曲线确保数值计算结果的可靠性. 固壁面设为无 滑移壁面 ,各速度分量均为 0 ,RNG *k* - ε 双方程模 型使雷诺平均方程封闭 ,其形式为

$$p \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_i \overline{S}_{ij} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad , \qquad (1)$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_s \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + 2C_{1s} \frac{\varepsilon}{k} v_{\mathrm{t}} \overline{S}_{ij} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - R - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} , \qquad (2)$$

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) , \qquad (3)$$

$$\mu_{\mathrm{eff}} = \mu_{\mathrm{t}} + \mu$$
 , (4)

$$R = \frac{C_{\mu}\rho\eta^{3}\left(\frac{1-\eta}{\eta_{0}}\right)}{\frac{\varepsilon^{2}}{1-\varepsilon^{3}}}\frac{\varepsilon^{2}}{\varepsilon^{2}},$$
(5)

$$n = \frac{Sk}{2} . \tag{6}$$

式中: ρ 为流体密度 ,kg/m³; μ_{eff} 为有效黏性系数; μ_{t} 为湍流黏性系数; μ 为分子黏性系数; $S = \sqrt{2 s_{ij} s_{ij}} \bar{S}_{ij}$ 为应变率张量; R 为 ε 方程中的附加源项 ,表示平均 应变率对 ε 的影响; η 为湍流和平均拉伸的时间尺 度之比 , $\eta = Sk/\varepsilon$; 模型的参数 $C_{\mu} = 0.0845$, $C_{1\varepsilon} = 0.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\alpha_k = 1.0$, $\alpha_{\varepsilon} = 0.769$, $\beta = 0.012$, $\eta_0 = 4.38$.

2.2 空化模型

1

空化模型选用 ANSYS CFX 软件提供的均相流 (Homogeneous) 模型,此模型认为蒸汽速度与液体速 度相同 采用 Rayleigh – Plesset 方程描述空泡形成和 溃灭时液相与气相之间质量传递的过程,方程^[15]简 化为

$$\dot{m}_{1v} = -F_{v} \frac{3\rho_{v}\alpha_{1}\alpha_{nuc}}{R_{B}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_{v} - p|}{\rho_{f}}} \operatorname{sng}(p_{v} - p) ,$$
(7)

$$\dot{m}_{1c} = -F_{c} \frac{3\rho_{v}(1-\alpha_{1})}{R_{B}} \sqrt{\frac{2|p_{v}-p|}{3\rho_{f}}} \operatorname{sng}(p-p_{v}) ,$$
(8)

式中: ρ_v 为气相密度 , kg/m^3 ; α_1 为液相体积分数; α_{nuc} 为气核体积分数; R_B 为气泡直径 ,m; p_v 为饱和 蒸汽压力 ,Pa; p 为空泡周围液体的压力 ,Pa; ρ_f 为液 体密度 , kg/m^3 ; F_v , F_c 为气泡形成和溃灭时所取的 经验系数.

2.3 边界条件及交界面设置

数值计算时单相流和空化两相流都采用总压 进口,质量流量出口,固体壁面采用无滑移光滑壁 面边界条件.模拟过程中单相采用 25 ℃的清水为工 作介质,空化计算时采用两相,一种为液相,工作介 质同单相,另一相为气相,设为水蒸气,饱和蒸汽压 为3 169 Pa,空泡半径为2.0×10⁻⁶m,进口液相的 比率设为1,气相为0.进水段与诱导轮、叶轮与蜗壳 的动静交接面设为 Frozen rotor,诱导轮与叶轮设置 为一个计算区域.在额定工况下,对不同口环间隙 的诱导轮离心泵进行单相流动数值计算,以此收敛 结果作为空化数值计算的初始流场,通过不断减小 进口总压力值进行定常空化数值计算.

3 结果与分析

3.1 数值计算结果与试验结果分析

图 3 为该诱导轮离心泵在口环间隙为 b₂ =0.25 mm 时的试验和数值计算所得不同工况点的扬程效 率曲线对比图 ,其中 H ,η 为数值计算值 ,H´,η´为试 验值. 从图中可以看出 ,在设计点附近 ,数值计算值 与试验值比较接近; 随着流量值偏离设计工况点 , 数值计算值与试验值偏差有所增大 ,但是总体趋势 一致; 数值计算值高于试验值 ,扬程和效率相对试 验值的最大误差分别不超过 6.5% 和 10.6%.文中 只考虑了前口环间隙 ,忽略了后口环间隙的容积损 失以及轴承等处的机械损失 ,而且在偏离设计工况 时 ,诱导轮离心泵中的流动变得复杂 ,数值计算值 和试验值存在较大的差距 ,不过这种偏差在可接受 的范围之内 ,所以文中所用的湍流模型和计算结果 具有准确性和可行性.



图 3 数值计算与试验值对比 Fig. 3 Comparison between simulation results and experimental results

3.2 口环间隙对水力性能的影响

图 4 为无空化条件下,不同口环间隙时诱导轮 离心泵总扬程和总效率的预测值. 从图中可以看 出 随着口环间隙值的增大,诱导轮离心泵的总扬 程和效率都降低,与 b₁相比,b₂,b₃和 b₄的扬程分 别下降 0.10%,0.30%和 0.60%,效率分别下降了 2.40% *A*.30% 和 6.50% ,可见口环间隙 *b* 的大小对 效率的影响更加明显.





图 5 通过数值模拟和叶轮密封环经验公式^[10] 分别得到不同口环间隙下的泄漏量 2 种计算所得 泄漏量相当. 从图中可以看出随着口环间隙的增 大,口环处的泄漏量急剧增大,直接导致了泵容积 效率的下降;另外泄漏流体进入叶轮进口前,形成 旋涡区,叶轮机械内旋涡区是流体动能高度集中的 区域^[17] ,流体的沿程损失与流体速度的平方成正 比 因此引起叶轮水力效率的下降.



图 5 诱导轮离心泵前口环泄漏量



图 6 为无空化条件和设计工况下,诱导轮和离 心泵叶轮口环间隙 – 扬程、效率关系曲线.其中诱 导轮的扬程、效率计算公式为

$$H_{\rm ind} = \frac{p_{\rm ind \ \rho ut} - p_{\rm ind \ in}}{\rho g} , \qquad (9)$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H_{\text{ind}}}{T_{\text{ind}} \omega} = \frac{Q(p_{\text{ind } \rho \text{ut}} - p_{\text{ind } in})}{T_{\text{ind}} \omega} , \quad (10)$$

式中: *p*_{ind ,out} *p*_{ind in} 分别为诱导轮出口和进口总压; *T*_{ind}为诱导轮旋转产生的转矩; ω 为诱导轮旋转角速 度 ,大小与离心叶轮旋转角速度相同.

从诱导轮扬程效率曲线图可以看出,随着口环间隙增大,诱导轮扬程和效率都呈逐渐增大的趋势,与 *b*₁相比,*b*₂,*b*₃和 *b*₄的扬程分别增大了2.08%,10.97%和29.86%,效率分别增加了1.93%,10.55%和28.40%.





图 7 为诱导轮静压分布图 ,从图 7a 中可以看 出 随着口环间隙 b 值的增大,诱导轮出口静压逐渐 增大 b 值越大,增加幅度越大. 与图 7b, c 相比,发 现在不同 b 值下,叶片工作面和背面的静压值分布 均匀 都随着轴向长度的增加而增大,并且在同一 轴向长度,叶片工作面的静压值大于背面的静压 值. 同时还可以看到不同 b 值时,诱导轮叶片工作面 和背面静压分布基本无差异,所以诱导轮扬程的增 加并非诱导轮叶片做功的结果,而是口环出口处的 高压流体泄漏到叶轮进口与诱导轮出口区域引起 的局部压增.从离心泵叶轮的扬程效率曲线图可以 看出,随着 b 值的增大,叶轮扬程和效率都下降,与 b₁相比 b₂ b₃和 b₄扬程分别下降 0.79% 2.37% 和 4.21% 效率分别下降 2.32% 5.65% 和 9.32%.由 此可知,口环间隙的增大增加了诱导轮扬程效率, 降低了离心叶轮的扬程和效率 效率的增加和下降 较扬程更加明显.



3.3 口环间隙对空化性能的影响

662

设计工况下,绘制如图8所示的不同口环间隙 时的空化性能曲线,其中,空化数的计算公式^[18]为

$$\sigma = (p_{\rm in} - p_{\rm v}) / \left(\frac{1}{2}\rho U_1^2\right) , \qquad (11)$$

式中: p_{in} 为进口静压力; p_v 为汽化压力; ρ 为流体密度; U_1 为叶片进口边与前盖板交点处圆周速度.





Fig. 8 Cavitation curves with different wear-ring clearance under design condition

由图 8 可知,空化数降低到一定程度,扬程开始 下降,这主要是产生的空泡累积到一定数量后,占 据了叶片间的流道,从而引起叶轮内流线和流速的 改变相应的速度三角形发生变化.当进口压力降 低到临界空化点(扬程下降3.00%)之后,空泡向叶 轮流道出口方向发展,叶片后缘直接影响能量的转 换,因此,临界空化点后扬程急剧下降.另外,叶轮 内流体的一部分能量被压缩和凝结空泡消耗.同时 还可以从图中看出,当空化数降低到一定程度时, 空化性能曲线出现波动现象,甚至在 b₄ 时较小的空 化数时就出现明显的波动,这种形式的空化性能曲 线规律类似于离心泵小流量工况下空化性能曲线

图 9 为不同口环间隙下诱导轮离心泵叶轮内的 空泡分布 图中的空化区域由气体体积分数为 10% 的气体等值面构成.



片背面是叶片压力最低点,此处是流道转弯的内 壁,在离心力的作用下流体流速大,压力相对较 低,是叶轮内最容易发生空化的地方.初生空化 时,空泡附着在低压区,在局部区域产生和溃灭, 不影响能量的转换,所以对扬程并不会产生影响. 随着进口压力的降低,空泡在叶片表面的分布区 域逐渐增大,沿着叶片背面向工作面扩散. $\sigma =$ 0.074 时,叶片工作面靠近前盖板的地方也出现空 泡分布,工作面上的空泡易于向低压侧扩散,使空 化区不稳定,扬程在较低的进口压力下产生波动 很可能就是因为空化区的不稳定引起的. $\sigma =$ 0.036 时,靠近隔舌位置的叶轮流道被堵塞,其他 流道内的空泡区域也迅速增加,结合图8可知,此 时扬程急剧下降. 对比分析图 9a, b, c 和 d, σ = 0.417 时 随着 b 值的增大,叶片背面上的空泡分 布区域有所减小 在 b₄ 时,空泡在叶片背面靠近后

盖板处有较小的分布区域. 但是,从局部图中发现 随着 b 值增大,叶片工作面靠近前盖板处空泡区 域逐渐增大. 叶片工作面出现空泡分布, 这是因为 叶片进口出现负冲角. 从图 7a 发现,诱导轮出口平 均压力随着口环间隙的增大分布越不均匀,液流流 态发生变化 从而使得叶轮进口前的液流角改变而 引起叶片进口冲角的改变. 结合图 10 中 σ = 0.052 和 $\sigma = 0.036$ 叶轮截面上的空泡体积分数 α 分布 图 发现随着进口压力的降低 ,同一空化数下 ,b 增 大,叶片工作面和背面的空泡分布区域增大,b。以 后工作面的空泡区域逐渐增加 图 10 中工作面的空 泡区域呈云状分布,空泡向叶轮背面流道的方向扩 散 具有明显的空化不稳定性. 压力进一步降低 $\sigma =$ 0.036 时 ,空泡已经堵塞了叶轮流道 b 越大 堵塞的 流道个数越多 堵塞面积越大.表明口环间隙越大, 临界空化数增大 空化稳定性变差.





如图 9 中所示,当 σ = 0.074,口环间隙为 b_1 和 b_2 时,叶轮进口处无空泡分布,而当口环间隙为 b_3 和 b_4 时,叶轮进口处有较少环状空泡分布. σ 逐渐降低 b增大时叶轮进口处的环状空泡分布区域越 大.环状空泡位于叶轮流道进口和口环间隙出口相 交位置处,此环状是以叶轮进口中心为圆心,半径 小于口环间隙的区域. σ = 0.036时,不同口环间隙 下的叶轮进口均存在片状空泡区,此时空泡已经完 全堵塞了诱导轮的流道,并延伸到诱导轮出口,因 此认为此处的空泡分布是诱导轮内的空泡脱落进 入了叶轮进口处.

诱导轮离心泵叶轮的必需汽蚀余量 *NPSHR* 与 离心泵叶轮入口的参数 v₁ 和 w₁ 有关,一定压力下, b 越大,口环间隙处空泡分布区域越大,减小了液流 的过流面积,液流速度增加,*NPSHR* 增大,离心泵越 容易发生空化.通常,设计合理的诱导轮内的汽蚀 严重性与主叶轮的汽蚀严重性并不成正比,离心泵 的初生空化点和临界空化点在诱导轮空化工况点 后的某点处.诱导轮内空化发展到一定程度,就会 影响叶片出口处液流的流态分布,出口液流角发生 变化.因此,离心泵内的空化不稳定性的另一个原因是前置诱导轮空化引起叶片出口液流角的变化.

4 结 论

采用数值计算方法对4种口环间隙下的前置诱 导轮离心泵进行定常空化数值计算,获得额定工况 下诱导轮离心泵的外特性和空化流动特性,结论 如下:

 1) 原模型(b₂ = 0.25 mm) 不同工况下的数值 计算结果和试验结果比较接近,数值计算结果准确 可行.

2) 口环间隙处的泄漏流对诱导轮离心泵的扬程、效率影响较大,随着口环间隙的增大,与口环间隙为 b₁相比,总扬程和总效率分别下降了 0.60% 和 6.50%;离心叶轮扬程和效率分别下降了 4.21% 和 9.32%;诱导轮扬程和效率分别增加了 29.86% 和 28.40%.口环间隙增大对效率的影响更加显著.

3) 口环间隙大小对诱导轮离心泵空化性能影响 较大 随着口环间隙的增大,空化性能曲线出现波动 现象,间隙越大,波动越明显;空化数降低,离心泵主 叶轮工作面靠近前盖板出现云状空泡分布,空化不稳 定,间隙越大,空化越不稳定,临界空化数越大.

4) 口环间隙出口处泄漏高压流体对主流的冲击、口环附近空化的发生、诱导轮空化引起叶片出口液流角的变化可能是诱导轮离心泵空化出现不稳定的影响因素.

参考文献(References)

 [1] 罗先武 涨瑶 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]. J Tsinghua University (sci & tech) , 2008 , 48(5): 836 – 839. (in Chinese)

[2] 刘宜 李永乐 韩伟 等. 离心泵的进口几何参数对泵
 空化性能的影响[J]. 兰州理工大学学报 ,2011 ,37
 (1):50-53.

LIU Yi , LI Yongle , HAN Wei , et al. Effect of geometric parameters of centrifugal pump inlet on its cavitation performance [J]. Journal of Lanzhou University of Technology , 2011 , 37(1):50 – 53. (in Chinese)

[3] 张永学,宋鹏飞,许聪,等.预旋调节对离心泵空化影响的试验与数值模拟[J].农业机械学报,2014,45

(9):131-137.

ZHANG Yongxue , SONG Pengfei , XU Cong , et al. Experimental and numerical investigations of cavitation in a centrifugal pump with pre-whirl regulation [J]. Transactions of the CSAM , 2014 A5(9): 131 – 137. (in Chinese)

- [4] SAMANODY M A E , GHORAB A , MOSTAFA M A F. Investigations on the performance of centrifugal pumps in conjunction with inducers [J]. Ain shams engineering journal , 2013 , 5(1): 149 – 156.
- [5] 舒安庆,张生,赵彦修.加装诱导轮改善离心泵抗汽 蚀性能[J].化工设备与管道,2003,40(3):34-36.
 SHU Anqing, ZHANG Sheng, ZHAO Yanxiu. Use of inducer for improving property of anti-cavitation of centrifugal pump[J]. Process equipment & piping, 2003, 40(3):34-36.(in Chinese)
- [6] HASSAN W, BARRE S, LEGOUPIL S. Study of the behavior of vapor fraction in a turbopump inducer using an X-ray measurement technique [J]. Experiments in fluids, 2014, 55(5):1-14.
- [7] 李晓俊. 离心泵叶片前缘空化非定常流动机理及动 力学特性研究[D]. 镇江: 江苏大学 2013.
- [8] GUO X M , ZHU L , ZHU Z C , et al. Numerical and experimental investigations on the cavitation characteristics of a high-speed centrifugal pump with a splitter-blade inducer [J]. Journal of mechanical science & technology , 2015 , 29(1): 259 – 267.
- [9] 郭晓梅 朱祖超 准宝玲,等.诱导轮长短叶片位置对 高速离心泵汽蚀性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2012 33(10):1695-1698.
 GUO Xiaomei, ZHU Zuchao, CUI Baoling, et al. Inducer-short blade position influence on cavitation performance of high speed centrifugal pump [J]. Journal of engineering thermophysics, 2012,33(10): 1695 -1698. (in Chinese)
- [10] 郭晓梅 李昳 准宝玲 等.前置不同诱导轮高速离心 泵旋转空化特性研究 [J].航空学报,2013,34(7): 1572-1581.

GUO Xiaomei , LI Yi , CUI Baoling , et al. Research on the rotation cavitation performance of high-speed rotation centrifugal pump with different pre-positioned inducer [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica , 2013 ,34 (7):1572 – 1581. (in Chinese)

[11] LI W G. An experimental study on the effect of oil viscosity and wear-ring clearance on the performance of an industrial centrifugal pump [J]. Journal of fluids engineering, 2012, 134(1):93 - 108.

(下转第671页)

第8期

[J]. Vibrations , 1988 , 4(3) : 21 - 23.

- [7] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:中国宇航出版 社 2011.
- [8] 张德胜 施卫东, 王川 等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数 对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报 2012 30 (2):167-170.

ZHANG Desheng , SHI Weidong , WANG Chuan , et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering ,2012 ,30 (2): 167 – 170. (in Chinese)

- [9] 袁寿其 施卫东 刘厚林 ,等. 泵理论与技术 [M]. 北 京: 机械工业出版社 2014.
- [10] 王川 陆伟刚 施卫东 等. 不锈钢冲压潜水井泵的数 值计算与试验验证 [J]. 江苏大学学报(自然科学 版) 2012 33(2):176-180.

WANG Chuan , LU Weiguang , SHI Weidong , et al. Numerical calculation and experimental verification of stainless steel stamping submersible well pump [J]. Journal of Jiangsu University(natural science edition) , 2012 , 33(2): 176 – 180. (in Chinese)

- [11] 司乔瑞 袁寿其,王川,等.低比速多级潜水泵优化设计[J].农业工程学报 2012 28(8):122-127.
 SI Qiaorui, YUAN Shouqi, WANG Chuan, et al. Optimal design submersible multistage pumps with low specific speed [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28 (8): 122-127. (in Chinese)
- (上接第664页)
- [12] 赵伟国, 邬国秀 黎义斌,等. 口环间隙变化对离心泵 性能的影响研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5):
 211-215.
 ZHAO Weiguo, WU Guoxiu, LI Yibin, et al. Study on effects of wear-rings clea-rance modifications on perfor-

mance of centrifugal pump [J]. Journal of hydroelectric engineering , 2014 33(5): 211 – 215. (in Chinese)

- [13] 黄先北,刘竹青,杨魏. 离心泵口环间隙附近的空化 特性研究[J]. 农业机械学报 2015 46(2):59-63.
 HUANG Xianbei, LIU Zhuqing, YANG Wei. Cavitation characteristics of centrifugal pump near wear-ring clearance[J]. Transactions of the CSAM, 2015 46(2):59 -63. (in Chinese)
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社 2004.
- [15] 常书平,王永生. 基于 CFD 的混流泵空化特性研究
 [J]. 排灌机械工程学报 2012 30(2):171-175.
 CHANG Shuping, WANG Yongsheng. Cavitation performance research of mixed-flow pump based on CFD

- [12] DERAKHSHAN S, NOURBAKHSH A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation [J]. Experimental thermal and fluid science, 2008, 32(8): 1620 – 1627.
- [13] 周岭 施卫东 陆伟刚. 基于数值模拟的深井离心泵导 叶性能分析[J]. 农业工程学报 2011 27(9):38-42.
 ZHOU Ling, SHI Weidong, LU Weigang. Performance analysis on deep-well centrifugal pump guide vanes based on numerical simulation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 38-42. (in Chinese)
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社 2004.
- [15] ZOBEIRI A , KUENY J L , FARHAT M , et al. Pumpturbine rotor-stator interactions in generating mode: pressure fluctuation in distributor channel [J]. Proceedings of 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Yokohama [s. n.], 2006: 17 – 31.
- [16] 周岭 施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵内部非定常流动的压力脉动特性分析[J]. 农业工程学报 2011 27 (10):44-49.

ZHOU Ling , SHI Weidong , LU Weigang , et al. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in deep-well centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE , 2011 , 27(10): 44 – 49. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)

[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering , 2012 , 30(2): 171 - 175. (in Chinese)

- [16] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版 社 2011.
- [17] 何立东,叶小强,霍耿磊.叶尖密封流场的细观特性 对叶轮机械性能的影响[J].润滑与密封 2006(4): 171-174.

HE Lidong , YE Xiaoqiang , HUO Genglei. The influence of mesoscopic characteristic of tip seal flow field on turbomachinery [J]. Lubrication engineering ,2006 (4):171-174. (in Chinese)

- [18] 潘中永,袁寿其. 泵空化基础[M]. 镇江: 江苏大学出版社 2013.
- [19] FU Y, YUAN J, YUAN S, et al. Numerical and experimental analysis of flow phenomena in a centrifugal pump operating under low flow rates [J]. Journal of fluids engineering, 2014, 137(1): 205 – 207.

(责任编辑 盛杰)