

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0251



口环间隙变化对高转速离心泵性能的影响

杨从新¹, 强盼¹, 安莎², 徐楠², 刘军年²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)



杨从新

摘要: 为了阐明口环间隙变化对高转速离心泵性能的影响,以一台转速 n 为 38 500 r/min 的离心泵为研究对象,基于泵几何参数,建立前、后口环间隙变化为 0.01 mm 的 16 种匹配方案,通过数值模拟方法预测了不同匹配方案下离心泵的性能。结果表明:当后口环间隙越小时,效率及轴功率对前口环间隙变化的敏感度越高;当前口环间隙越小时,效率及轴功率对后口环间隙变化的敏感度也越高;当前口环间隙一定时,随着后口环间隙的增大,扬程下降;当后口环间隙一定时,扬程随着前口环间隙的增大出现微小上升;无论是小间隙匹配还是大间隙匹配,前、后口环处泄漏量均随着流量的增大而减小;匹配的间隙值越大,对应模型的扬程及效率越低,功率越大,扬程随流量的变化越明显;口环内部水力阻力的形成主要是消耗了静压,液体通过口环后,其速度的变化并不明显;随着口环间隙的增大,在口环内同一位置处静压下降,动压上升。

关键词: 离心泵;高转速;口环间隙;匹配;性能

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)01-0018-07

杨从新,强盼,安莎,等. 口环间隙变化对高转速离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):18-24.

YANG Congxin, QIANG Pan, AN Sha, et al. Effects of wear-ring clearance on performance of high-speed centrifugal pump[J].

Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017,35(1):18-24. (in Chinese)

Effects of wear-ring clearance on performance of high-speed centrifugal pump

YANG Congxin¹, QIANG Pan¹, AN Sha², XU Nan², LIU Junnian²

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: In order to clarify effects of wear-ring clearance on the performance of high-speed centrifugal pump, a centrifugal pump with speed of 38 500 r/min is studied. Firstly, 16 cases are generated by combining the clearances of the front and rear wear-rings with 0.01 mm increment, then the performance of the pumps with these wear-ring clearance are predicted by means of numerical simulation. The results show that when the rear wear-ring clearance are smaller, the efficiency and shaft power are more sensitive to the change in the front wear-ring clearance. Likewise, when the front wear-ring clearance is kept smaller, the efficiency and shaft power are sensitive to the change in the rear wear-ring clearance too. The head of pump decreases with increasing rear wear-ring clearance at a constant front wear-ring clearance. However, the head rises slightly with increasing front wear-ring clearance at a constant rear wear-ring clearance. Even though the leakage through the front and rear wear-ring gaps decreases with increasing flow rate whatever both the clearances are, the efficiency and head are lo-

收稿日期: 2015-11-16; 网络出版时间: 2017-01-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170109.0846.028.html>

作者简介: 杨从新(1964—),男,陕西兴平人,教授,博士生导师(yexwind@163.com),主要从事流体机械设计研究。

强盼(1990—),女,甘肃会宁人,硕士研究生(通信作者,qiangpan_fluidfly@163.com),主要从事流体机械内部流动研究。

wer, and the head varies more significantly against flow rate with two increasing clearances. The hydraulic resistance in a wear-ring gap is mainly to generate a liquid static pressure drop because the velocity of liquid does not change obviously at the wear-ring outlet. With the increase of wear-ring clearance, the static pressure drop and dynamic pressure at an axial position rise in the wear-ring clearance.

Key words: centrifugal pump; high-speed; wear-rings clearance; matching; performance

流体机械间隙流动一直是国内外学者研究的热点^[1-3]. 叶轮口环间隙作为泵转子与定子的衔接部位,直接连通了高压腔与低压腔,它的存在不仅造成了容积损失,而且改变了离心泵的内部流态,从而对离心泵的外特性产生重要影响. 目前关于常速状态下口环间隙对离心泵及其他流体机械性能影响的研究较多^[4-6],一些学者^[7-9]就口环间隙对泵腔内压力、速度分布以及水力激励特性等流动特征进行了分析,有关口环间隙与泵汽蚀之间关系的研究^[10]也有涉及. TOSHIO 等^[11]还对汽轮机迷宫形式的密封进行了研究,分析了密封间隙对转子受力的影响.

上述都是针对常速泵所做的研究,而对高速泵的研究鲜有报道. 文中以一台转速 $n = 38\ 500$ r/min 的离心泵为研究对象,该泵应用于航天领域,对性能稳定性要求很高. 该泵间隙非常微小,而制造过程中可能出现的加工误差还会使其发生改变. 由于该高速离心泵应用领域特殊,间隙的微小变化将对其性能产生重要影响. 针对于此,文中建立前、后口环间隙变化为 0.01 mm 的 16 种间隙匹配方案,研究实际产品可能的任意间隙匹配对泵性能的影响.

1 计算模型

1.1 物理模型

模型泵的主要设计参数分别为流量 $Q = 0.95$ L/s, 转速 $n = 38\ 500$ r/min, 叶轮进口直径 $D_1 = 22.0$ mm, 出口直径 $D_2 = 50.5$ mm, 前口环间隙 $\delta_1 = 0.07$ mm, 后口环间隙 $\delta_2 = 0.10$ mm, 长短叶片相间布置, 叶片数均为 6. 根据过流部件的几何参数对泵水体部分进行三维建模,为了保证进、出口流动的稳定性和对泵的进、出口段适度延长. 图 1 为泵及口环结构示意图.

为研究口环间隙对高转速泵性能的影响,设计了 16 种前、后口环间隙匹配方案,即前口环间隙 $\delta_1 = 0.05, 0.07, 0.09, 0.11$ mm, 后口环间隙 $\delta_2 = 0.08, 0.10, 0.12, 0.14$ mm, 分别一一匹配.

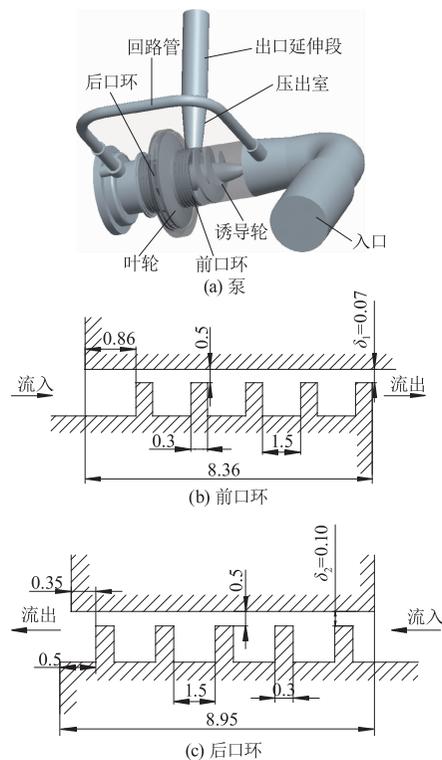


图 1 泵及口环结构示意图
Fig. 1 Sketch of pump and wear-ring structure

1.2 网格划分

利用 ANSYS ICEM CFD 软件对流体区域进行网格划分,为了保证计算精度同时减少计算时间,采用混合网格划分,即对叶轮口环部位采用结构化网格,对其他计算域采用非结构化网格,并对叶轮及蜗壳在扭曲较大处进行局部加密. 在保证计算结果不依赖网格数量的前提下,最终确定整个计算区域网格数为 1.5×10^7 以上.

2 数值计算方法

2.1 数值模型

控制方程采用连续方程和雷诺时均 N-S 方程,选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型封闭方程组. 压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法. 动量方程、湍动能与耗散率输运方程均采用二阶迎风格式. 在迭代计算的过程中,当泵进出口监测面上的总压变化稳定时

认为计算收敛。

2.2 边界条件

采用速度进口边界条件,假定来流方向垂直于进口截面。出口边界条件采用自由出流。壁面采用无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数法。旋转区域与静止区域之间的耦合采用多重参考系模型。

3 计算结果与分析

3.1 试验验证

为了验证数值计算方法的正确性,对模型泵在不同工况下的扬程与效率进行预测,并与试验结果进行对比,如图 2 所示。

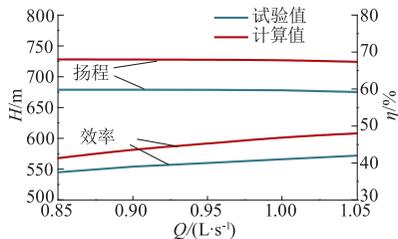


图 2 计算值与试验值对比

Fig. 2 Head and efficiency comparison between prediction and measurement

由图 2 可以看出:数值计算结果与试验结果具有比较一致的变化趋势,表明数值计算方法是正确的;计算值与试验值之间存在一定误差,这是由于轴承结构较为复杂,在进行数值计算时对轴承部位做了简化处理,使得计算过程并不能完全真实地反映轴承运行情况,泵转速极高,且轴承结构复杂,流体在泵体中的水力损失与机械损失较大,故造成了泵扬程及效率计算值与试验值的误差。

3.2 前、后口环间隙变化对泵性能的影响

为了研究设计工况下前口环间隙对泵性能的影响,选取后口环间隙 $\delta_2 = 0.10 \text{ mm}$,对应不同前口环间隙进行计算,图 3 为不同前口环间隙时泵的性能曲线。

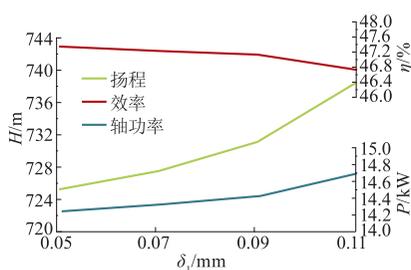


图 3 前口环间隙对泵性能的影响

Fig. 3 Effects of front wear-ring clearance on pump performance

由图 3 可以看出:随着前口环间隙的增大,泵效率呈下降趋势,总下降量为 0.62%;轴功率呈上升趋势,总上升量为 0.45 kW;扬程随着前口环间隙的增大呈上升趋势,这一现象与以往研究结果有所不同。

在低比转数离心泵中,将由叶轮出口流经前泵腔再经过口环流入叶轮进口的流体归入容积损失中,但该部分流体在流入前泵腔之初具有很高能量,根据流体力学的知识可知,液体圆周速度为 $u/2$ (u 为前盖板圆周速度),从叶轮中流出的液体,特别是低比转数离心泵,圆周速度非常大,通常都大于 $u_2/2$ (u_2 为叶片出口圆周速度),这部分高能流体作用于前泵腔内的旋转液体,使泵腔内液体与泵腔壁面之间的相对运动速度降低,进而使圆盘摩擦损失减小^[12]。

泄漏流体带给泵腔内的富余能量越多,圆盘摩擦损失越小。如不考虑泄漏流体在泵腔内的流动损失,则泄漏流体带给泵腔内的富余能量 ΔE 等于截面 1-1 处泄漏流体的能量 E_{1-1} 与截面 2-2 处泄漏流体的能量 E_{2-2} 之差(见图 4),即

$$\begin{aligned} \Delta E &= \rho g q_v H_{1-1} - \rho g q_v H_{2-2} = \\ &= q_v p_{1-1} - q_v p_{2-2} = \\ &= q_v (p_{1-1} - p_{2-2}), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p_{1-1}, p_{2-2} 分别为截面 1-1 和截面 2-2 处的总压力; q_v 为泄漏量。

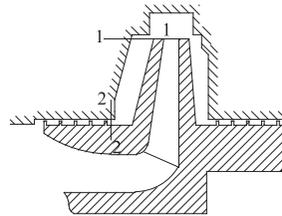


图 4 泵腔示意图

Fig. 4 Sketch of pump side chambers

表 1 为不同前口环间隙时计算得到的截面 1-1, 2-2 总压,可以看出:随着前口环间隙的增大, Δp 依次增大,又由于泄漏量 q_v 也是随前口环间隙的增大而增大,所以 ΔE 即泄漏流体带给泵腔内的富余能量是随着前口环间隙的增大而增大的,也即圆盘摩擦损失随着前口环间隙值的增大而减小,这与文献[12]研究结果一致。

圆盘摩擦损失效率是机械效率的重要组成部分,而机械效率也是随间隙的增大而升高的。圆盘摩擦损失在泵总损失中占有很大比重,虽然容积损

失随着泵泄漏量的增大而减小,但由于文中研究对象的间隙变化极其微小,故因间隙值的增大而造成容积损失上升这一因素较因间隙值的增大而造成圆盘摩擦损失下降这一现象,后者的影响更为明显.因此,在图 3 中,随着前口环间隙的增大扬程出现了微小的上升(总升量为 13.2 m).

表 1 不同前口环间隙下截面 1-1,2-2 总压值
Tab.1 Total pressure in section 1-1 and 2-2 at different front wear-ring clearances

δ_1/mm	p_{1-1}/Pa	p_{2-2}/Pa	$p_{1-1} - p_{2-2}/\text{Pa}$
0.05	5 202 030	3 770 000	1 432 030
0.07	5 271 420	3 831 590	1 439 830
0.09	5 330 210	3 879 110	1 451 100
0.11	5 408 380	3 946 890	1 461 490

选取设计工况时前口环间隙 $\delta_1 = 0.07 \text{ mm}$, 对应不同后口环间隙进行计算,图 5 为不同后口环间隙时泵的性能曲线.

由图 5 可以看出:随着后口环间隙的增大,泵的扬程和效率均出现不同程度下降,扬程变化的最大值为 7.59 m,效率变化的最大值为 1.49%;随着后

口环间隙的增大,轴功率呈上升趋势,最大变化值为 0.31 kW.

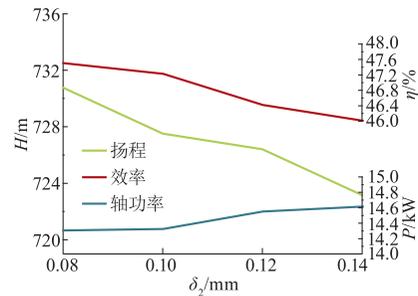


图 5 后口环间隙对泵性能的影响
Fig.5 Effects of rear wear-ring clearance on pump performance

图 6 为前口环间隙 $\delta_1 = 0.07 \text{ mm}$ 时,不同后口环间隙下泵腔内的静压分布,可以看出,随着后口环间隙的增大,泵腔内靠近后口环处区域的压力不断降低,且随着间隙的增大,低压区不断向蜗壳方向发展,最终导致蜗壳内压力的下降,这与扬程的下降结论一致.

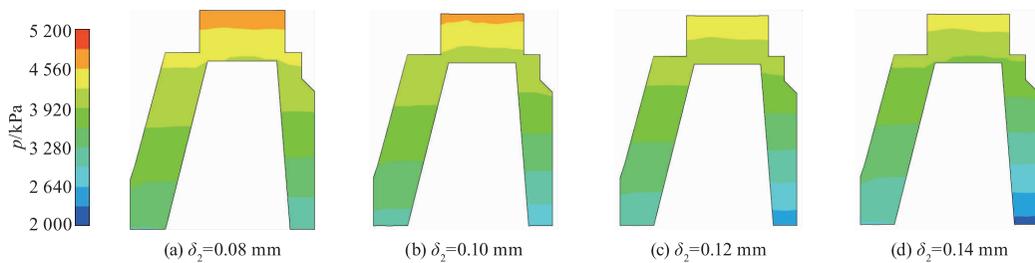


图 6 泵腔内静压分布
Fig.6 Static pressure distribution in side chambers

3.3 前、后口环间隙匹配对泵性能的影响

口环间隙的微小变化会对泵性能产生较大影响,而前、后口环间隙的匹配也非常重要.为了研究

前、后口环间隙匹配对泵性能的影响,分别选取后口环间隙 $\delta_2 = 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 \text{ mm}$ 时,对应不同的前口环间隙进行计算,结果如图 7 所示.

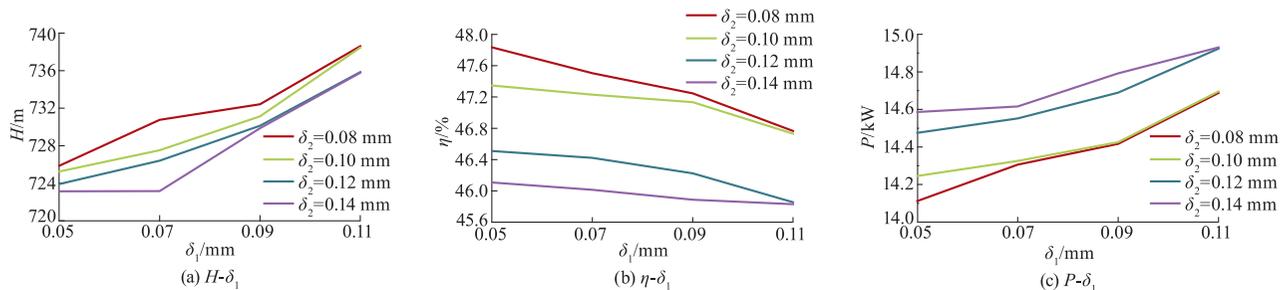


图 7 前、后口环间隙匹配对泵性能的影响
Fig.7 Effects of front and rear wear-rings clearances on pump performance

由图 7 可以看出:当 δ_2 分别为 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 mm 时,随着前口环间隙的增大,泵效率均呈现下降趋势,轴功率呈现上升趋势;当 δ_1 分别

为 0.05, 0.07, 0.09, 0.11 mm 时,随着后口环间隙的增大,泵的扬程和效率呈现不同程度的下降趋势,轴功率呈现上升趋势;随着后口环间隙的增大,

扬程变化的最大值分别为 2.73, 7.59, 2.55, 2.83 m, 效率变化的最大值分别为 1.73%, 1.48%, 1.35%, 0.94%, 轴功率变化的最大值分别为 0.47, 0.31, 0.38, 0.24 kW; 除前口环间隙 $\delta_1 = 0.07$ mm 外, 随着后口环间隙的增大, 扬程出现较大的下降, 其余不同前口环间隙对扬程随后口环间隙的变化影响不大; 当前口环间隙 δ_1 从 0.05 mm 增大到 0.11 mm 时, 效率变化的最大值、轴功率变化的最大值都明显下降, 这说明效率及轴功率对后口环间隙变化的敏感度受前口环间隙的影响很大, 小前口环间隙下, 效率及轴功率对后口环间隙变化的敏感度远高于大前口环间隙下的情况。

不同前、后口环间隙匹配时计算得到泵性能参数的最大差值如表 2 所示, 可以看出: 当 $\delta_2 = 0.08$ mm 时效率下降更为明显, 总下降量为 1.07%; 当 $\delta_2 = 0.14$ mm 时效率总下降量最小, 仅为 0.28%; 当 $\delta_2 = 0.08$ mm 时轴功率总上升量最大, 为 0.58 kW, $\delta_2 = 0.14$ mm 时轴功率总上升量最小, 为 0.34 kW. 这说明效率及轴功率对前口环间隙的敏感度与后口环间隙有关, 当后口环间隙越小时, 效率及轴功率对前口环间隙变化的敏感度越高。

表 2 不同口环间隙匹配下泵性能参数的最大差值
Tab. 2 Maximal difference in performance at different wear-ring clearances

间隙/mm	$(\eta_{\max} - \eta_{\min})/\eta/\%$	$(H_{\max} - H_{\min})/H/\%$	$(P_{\max} - P_{\min})/P/\%$
$\delta_2 = 0.08$	2.27	1.75	4.02
$\delta_2 = 0.10$	1.31	1.81	3.14
$\delta_2 = 0.12$	1.38	1.64	3.13
$\delta_2 = 0.14$	0.59	1.74	2.40
$\delta_1 = 0.05$	3.66	0.38	3.31
$\delta_1 = 0.07$	3.15	1.04	2.16
$\delta_1 = 0.09$	2.88	0.35	2.62
$\delta_1 = 0.11$	1.98	0.39	1.69

限于篇幅, 文中选取 3 种不同前、后口环间隙匹配模型进行研究, 分别为模型 1 ($\delta_1 = 0.07$ mm, $\delta_2 = 0.10$ mm)、模型 2 ($\delta_1 = 0.05$ mm, $\delta_2 = 0.08$ mm) 和模型 3 ($\delta_1 = 0.11$ mm, $\delta_2 = 0.14$ mm), 预测其性能曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出: 匹配的间隙值越大, 对应的模型扬程及效率越低, 功率越大, 这与文献 [13] 研究结果相符合; 随着流量的增大, 模型 2 扬程下降了 3.09 m, 模型 1 扬程下降了 3.84 m, 模型 3 扬程下降了 4.30 m, 可见间隙越大, 扬程随流量的变化越明显; 模型 2 和模型 3 的效率及轴功率均随着流量的增大均匀上升, 且 2 个模型功率及效率增幅基本相同。

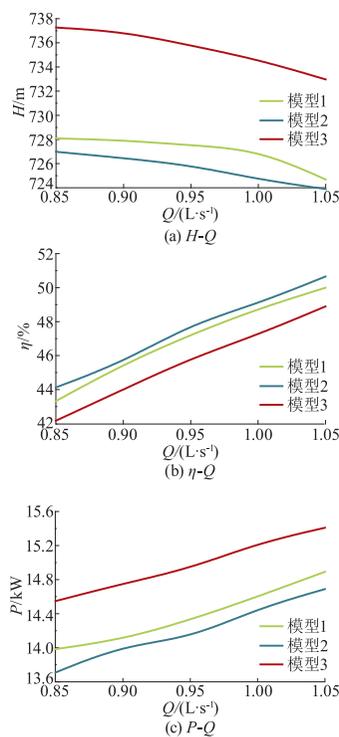


图 8 不同工况下前后口环间隙匹配对泵性能的影响

Fig. 8 Effects of front and rear wear-ring clearances on performance under different conditions

口环间隙的大小直接影响泵内液体的泄漏量。表 3 为设计工况下部分前、后口环不同间隙匹配时的泄漏量以及在总流量中所占的比值, 表中 q_{V1} , q_{V2} 分别为前、后口环泄漏量; a_1 , a_2 分别为前、后口环泄漏比; η_V 为容积效率。

表 3 不同口环间隙匹配下的泄漏值
Tab. 3 Leakage at different wear-ring clearances

δ_1/mm	δ_2/mm	$q_{V1}/(L \cdot s^{-1})$	a_1	$q_{V2}/(L \cdot s^{-1})$	a_2	$\eta_V/\%$
0.05	0.08	0.049 700 12	5.231 6	0.11 255 038	11.847 4	82.921
	0.14	0.049 294 60	5.188 9	0.21 648 809	22.788 2	72.023
0.11	0.08	0.15 077 403	15.871 0	0.11 200 222	11.789 7	72.339
	0.14	0.15 043 376	15.835 1	0.21 666 295	22.806 6	61.358

由表 3 可以看出: 当前口环间隙 δ_1 分别为 0.05, 0.11 mm 时, 随着后口环间隙的增大, 前口环泄漏量几乎没有变化, 而后口环泄漏量均出现明显增大; 当后口环间隙 δ_2 分别为 0.08, 0.14 mm 时, 后口环泄漏量随前口环间隙的增大变化不大, 而前口环泄漏量增大明显, 即前后口环的泄漏量只与本身间隙值的大小有关。

以模型 2 和模型 3 为研究对象, 分析其在不同工况下的泄漏情况, 如图 9 所示。由图 9 可以看出, 模型 2 及模型 3 的前、后口环处泄漏量均随着流量的增大而减小。流量增大, 泵的扬程降低。同样, 叶轮出口处的压力下降, 在该压力作用下从叶轮出口

流向泵腔的流体减少,且口环进口处的压力也下降,因此当泵流量增大时,泄漏量相应下降.

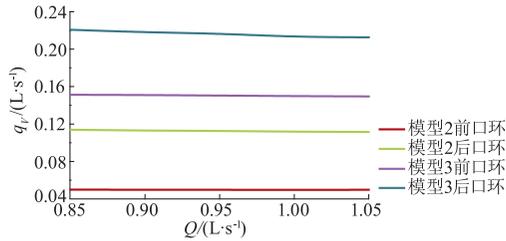


图9 不同工况下前后口环泄漏量

Fig.9 Leakage through front and rear wear-ring gaps under different conditions

3.4 前、后口环间隙匹配对口环内部流动的影响

将一侧口环间隙固定为最大值,研究另一侧口环间隙变化对口环内部流动的影响.即以 $\delta_1 = 0.11$ mm 的4个模型和 $\delta_2 = 0.14$ mm 的4个模型为例,取图10所示位置处的22个截面,分析口环间隙变化对口环内部流动的影响,图中箭头表示口环内液体流动方向.

图11为不同口环间隙时口环内部压力分布,可以看出:前、后口环内部动、静压总体上均是从进口到出口依次降低,其中静压下降更为明显,这说明

口环内部水力阻力的形成主要是消耗了静压,液体通过口环后,其速度的变化并不明显;随着前口环间隙的增大,前口环内静压下降,动压上升;前口环间隙的增大对后口环内压力分布几乎不产生影响;随着后口环间隙的增大,后口环内静压下降,动压上升;前口环内部动压分布几乎不发生变化,而静压随着后口环间隙的增大出现下降,这一现象与后口环内静压对前口环间隙变化的反应有所不同,它可能也是造成扬程随前、后口环间隙的增大变化不一致这一现象的原因之一.

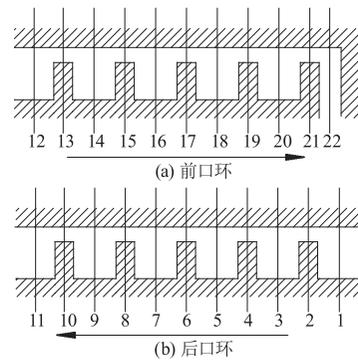


图10 口环位置示意图

Fig.10 Sketch of monitoring positions in wear-ring

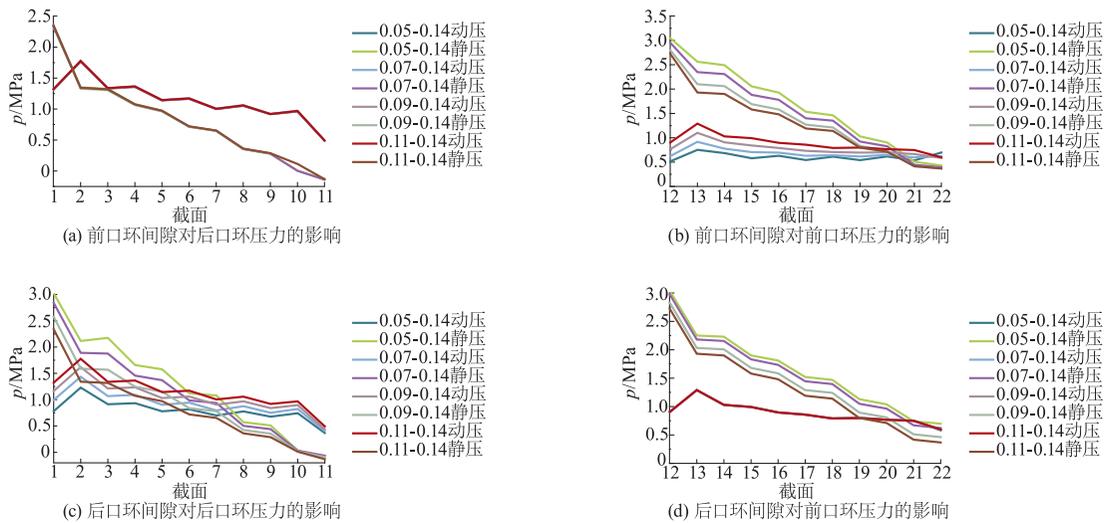


图11 口环间隙变化对口环内部压力分布的影响

Fig.11 Effects of wear-ring clearance on pressure distribution in wear-ring gap

4 结论

- 1) 当前口环间隙一定时,随着后口环间隙的增大,扬程下降.当后口环间隙一定时,扬程随着前口环间隙的增大出现微小上升.
- 2) 效率及功率对前口环间隙的敏感度与后口

环间隙有关,当后口环间隙越小时,效率及功率对前口环间隙变化的敏感度越高.效率及功率对后口环间隙变化的敏感度受前口环间隙的影响也很大,小前口环间隙下,效率及功率对后口环间隙变化的敏感度远高于大前口环间隙下的情况.

- 3) 口环内部水力阻力的形成主要是消耗了静压,液体通过口环后,其速度的变化并不明显.随着

口环间隙的增大,口环内静压下降,动压上升.

4) 无论是小间隙匹配还是大间隙匹配,前后口环处泄漏量均随着流量的增加而减小. 匹配的间隙值越大,对应的模型扬程及效率越低,功率越大.

参考文献 (References)

- [1] TARN L T, PRZEKWAŚ A J, MUSZYŃSKA A, et al. Numerical and analytical study of fluid dynamic forces in seals and bearings [J]. Journal of vibration and acoustics, 1988, 110(3): 315 - 325.
- [2] 李仁年, 韩伟, 李琪飞, 等. 间隙对螺旋离心泵性能影响的预测及试验 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 79 - 81.
LI Rennian, HAN Wei, LI Qifei, et al. Prediction and experiment about the effect of the clearance on performance of screw centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(6): 79 - 81. (in Chinese)
- [3] WILL B C, BENRA F K, DOHMEN H J. Investigation of the flow in the impeller side clearances of a centrifugal pump with volute casing [J]. Journal of thermal science, 2012, 21(3): 197 - 208.
- [4] 高雄发, 施卫东, 张启华, 等. 井用潜水泵级间间隙泄漏 CFD 分析与试验 [J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 96 - 100.
GAO Xiongfa, SHI Weidong, ZHANG Qihua, et al. CFD analysis and the experiment of inter-stage seal clearance on submersible well pump [J]. China rural water and hydropower, 2016(2): 96 - 100. (in Chinese)
- [5] 潘中永, 陈士星, 张大庆, 等. 叶轮口环间隙对离心泵性能影响的模拟和实验 [J]. 流体机械, 2012, 40(11): 10 - 14.
PAN Zhongyong, CHEN Shixing, ZHANG Daqing, et al. Simulation and experiment of the effect of clearance of impeller wear-rings on the performance of centrifugal pump [J]. Fluid machinery, 2012, 40(11): 10 - 14. (in Chinese)
- [6] 董云山, 杨爱玲, 陈二云, 等. 口环间隙泄漏射流对离心通风机流场品质的影响 [J]. 动力工程学报, 2016, 36(4): 286 - 293.
DONG Yunshan, YANG Ailing, CHEN Eryun, et al. Influence of clearance leakage jet flow in wear-rings on flow characteristics of a centrifugal fan [J]. Journal of Chinese society of power engineering, 2016, 36(4): 286 - 293. (in Chinese)
- [7] 王秀勇, 王灿星, 黎义斌. 离心泵泵腔内流动特征的数值分析 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 86 - 90.
WANG Xiuyong, WANG Canxing, LI Yibin. Numerical study of flow characteristics in the impeller side chamber of centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(4): 86 - 90. (in Chinese)
- [8] 赵万勇, 赵爽, 王磊, 等. 离心油泵口环间隙对泵腔内流动的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(1): 33 - 36.
ZHAO Wanyong, ZHAO Shuang, WANG Lei, et al. Influence of seal ring clearance of centrifugal oil pump on flow characteristics of pump chamber [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(1): 33 - 36. (in Chinese)
- [9] 高波, 王震, 杨丽, 等. 不同口环间隙离心泵性能及水力激励特性分析及试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 34(7): 79 - 85.
GAO Bo, WANG Zhen, YANG Li, et al. Analysis and test of performance and hydraulic excitation characteristics of centrifugal pump with different seal ring clearances [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 34(7): 79 - 85. (in Chinese)
- [10] 牟介刚, 苏苗印, 张孝风, 等. 叶轮口环间隙对农用离心泵汽蚀性能的影响 [J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 25 - 29.
MU Jiegang, SU Miaoyin, ZHANG Xiaofeng, et al. Effect of clearance of impeller wear-rings on cavitation characteristic of agriculture pump [J]. Agricultural mechanization research, 2010, 32(11): 25 - 29. (in Chinese)
- [11] TOSHIO Hirano, GUO Z L, KIRK R G. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery-part II: labyrinth seal analysis [J]. Journal of engineering for gas turbines & power, 2005, 127: 820 - 826.
- [12] 王洋, 张翔. 叶轮口环间隙对低比转速离心泵效率的影响 [J]. 排灌机械, 2008, 26(6): 27 - 30.
WANG Yang, ZHANG Xiang. Effect of clearance of impeller wear-rings on efficiency of low specific speed centrifugal pump [J]. Drainage and irrigation machinery, 2008, 26(6): 27 - 30. (in Chinese)
- [13] 赵伟国, 邬国秀, 黎义斌, 等. 口环间隙变化对离心泵性能的研究 [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 clearance modifications on performance of centrifugal pump [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2014, 33(5): 211 - 215. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)