

基于熵产理论的高速多级深井泵间隙泄漏流损失特性

茅佳雨,曹卫东,张洋杰

(江苏大学流体机械工程技术研究中心,江苏 镇江 212013)

摘要:为了解口环间隙尺寸对高速多级深井泵内部流动特性的影响,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型和精细化网格,研究了口环间隙对泵内部流场的影响,基于熵产理论详细分析了不同口环间隙尺寸下泵内部的泄漏流损失特性。结果表明:随着口环间隙尺寸的增大,泵的扬程、效率呈下降趋势;泄漏量的增加使得叶轮入口处的流态恶化加剧,但口环间隙尺寸增加到一定范围时,泄漏量的增加会有所减缓;湍流耗散熵产是泵流动损失的主要部分,腔体和叶轮进口是产生流动损失的主要区域,口环间隙尺寸对腔体内部的旋涡特性影响不大,但对叶轮进口和叶轮流道内的旋涡强度影响明显。

关键词:高速多级深井泵;口环间隙尺寸;泄漏流;内部流场;湍流模型;熵产理论

中图分类号:TV136⁺.2;TH311 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0111-06

Leakage flow loss characteristics of a high speed multistage deep well pump based on entropy production theory//
MAO Jiayu, CAO Weidong, ZHANG Yangjie(*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

Abstract: In order to understand the effect of the ring clearance size on the internal flow characteristics of a high speed multistage deep well pump, based on SST $k-\omega$ turbulence model and refined mesh, the influence of the ring clearance on the internal flow field of the pump was studied. Based on the entropy generation theory, the characteristics of leakage flow loss in the pump under different ring clearance were analyzed in detail. The results show that with the increase of the ring clearance size, the total head and efficiency of the multistage pump show decreasing trends. The increase of leakage makes the flow pattern at the inlet of the impeller worsen. However, when the ring clearance size increases to a certain range, the increase of the leakage can slow down. Turbulent dissipative entropy production is the main part of the flow loss, and the cavity and impeller inlet are the major loss zones. The ring clearance size has little effect on the vortex characteristics in the cavity, but has an obvious effect on the vortex strength in the impeller inlet and impeller channel.

Key words: high speed multistage deep pump; ring clearance size; leakage flow; internal flow field; turbulence model; entropy production theory

多级深井泵是提取地下水的核心动力设备,在农业灌溉、石油化工等领域都有着广泛的应用^[1-2]。多级深井泵口环间隙的内部流场是研究的重点和难点^[3-4],口环间隙尺寸的不同不仅会改变泵内部流动状态,而且对泵的外特性有较大影响。口环间隙处的泄漏量对叶轮进口的主流存在一定的扰动作用,使叶轮进口处的流动更加紊乱,从而对泵的整体性能产生影响。口环间隙的存在也是高速多级深井泵产生较大容积损失的主要原因,但由于口环间隙尺寸相比于高速多级深井泵整体尺寸较小,常常会被忽略,从而无法捕捉口环间隙流动结构容积损失等参数,有必要深入研究口环间隙对高速多级深井泵

的容积损失和内部流动特性的影响。

针对多级深井泵性能优化以及口环间隙对其内部流场影响的研究较多^[5-9]。吴大转等^[10]分析了不同工况下多级泵的水力性能和口环间隙泄漏量及间隙内的流场结构,结果表明,设计工况附近的泄漏量预测值与经验公式计算结果相近,间隙内的回流和叶片出口处的损失随流量增大而减小;赵伟国等^[6,11]分析了3种不同口环间隙变化对离心泵整机性能、内部流动及轴向力和径向力的影响,结果表明,口环间隙尺寸的改变不仅会对离心泵的外特性、容积损失产生影响,而且从流场结构看,间隙变化的影响主要集中在前后腔体及间隙出口处;高波

等^[12-13]选取不同大小的口环间隙对离心泵的叶轮所受径向力以及压力脉动的变化进行了研究,结果表明,叶轮所受径向力随口环间隙的改变呈现非线性变化,当间隙增大时,口环一周的平均压力脉动、叶轮进口及其上游的压力脉动随之减小;Baskharone 等^[14]运用有限元法对多级泵间隙泄漏流及其影响进行了数值计算并与现有的叶轮泄漏分析模型进行了对比分析,研究表明两种方法存在差异并显示出有限元方法具有较好的可行性。目前,熵产是一种可以直观反映流体内部不可逆损失发生位置及能耗空间分布的有效工具。Li 等^[15]基于熵产理论分析了多级深井泵内部的能量损失情况及其产生的主要原因。此外,熵产理论在预测风机内部能量损失^[16]和水轮机内部能量损失^[17]等方面有着广泛应用。

本文以 6000 r/min 的高速多级深井泵为研究对象,建立了包含口环间隙、叶轮、腔体和导叶的整体模型,并基于熵产理论分析了 3 组不同尺寸的口环间隙泄漏流能量损失特性,以期设计多级深井泵的口环间隙提供参考。

1 计算模型与数值模拟方法

1.1 熵产理论

熵产是各种能量转换过程中不可逆的耗散效应。对于离心泵中的流动,一般忽略温度的影响,而边界层内的黏性力会使流体的机械能不可逆地转化为内能,从而引起熵产;同时泵内流体的高雷诺数流动所引起的湍流脉动也会产生水力损失并引发熵产。熵产率 S' 由两部分组成:

$$S' = S'_1 + S'_2 \tag{1}$$

式中: S'_1 为黏性耗散熵产率; S'_2 为湍流耗散熵产率。

各计算域的总熵产则可利用质点熵产率的积分公式求得:

$$S_1 = \int_V S'_1 dV \tag{2}$$

$$S_2 = \int_V S'_2 dV \tag{3}$$

式中: S_1 为黏性耗散熵产; S_2 为湍流耗散熵产; V 为计算域的体积。

1.2 计算模型和参数

利用 UG 软件构建高速多级深井泵计算模型,如图 1 所示。高速多级深井泵由叶轮、口环间隙、腔体和导叶组合而成,共 6 级;设计工况基本参数为:流量 $Q_{des} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 100 m,转速 6 000 r/min,比转速 63。

由于该模型每级的水力结构形式相同,并考虑

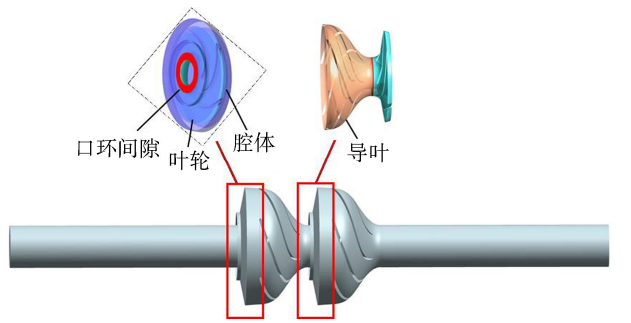


图 1 计算模型

计算时长和计算资源,因此选择两级水力部件进行数值模拟计算。泵的结构参数如下:叶轮出口直径为 65 mm,出口宽度为 2.8 mm,叶片数为 5;导叶出口直径为 22.75 mm,叶片数为 6;叶轮口环间隙内径与轮毂直径相同,为 17.5 mm,外径与叶轮进口直径相同,为 28 mm。在其他结构参数不改变的情况下,通过改变口环间隙宽度得到 3 组不同的口环间隙尺寸($\delta_1 = 0.15 \text{ mm}$, $\delta_2 = 0.35 \text{ mm}$, $\delta_3 = 0.55 \text{ mm}$),并建立了 3 组不同的计算模型进行分析。采用三维设计软件建立口环间隙、叶轮、腔体和导叶的计算模型如图 1 所示。

1.3 网格划分

为了提高计算精度,本文所用泵模型的各部分流体域都采用六面体结构化网格,并对叶片和其他水体近壁面处的网格做精细化处理,确保在设计工况下叶轮和导叶叶片的 y^+ (无量纲值,表示距离壁面第一层网格的高度) 平均值小于 30,从而满足湍流模型的收敛要求,各流体计算域划分后的网格如图 2 所示,叶轮和导叶的 y^+ 值如图 3 所示。为了控制近壁面处和口环间隙内的网格细化程度,通过调整网格节点数制定了 5 套方案,最终得到的各方案网格情况如表 1 所示。通过设置 5 组不同数量的流

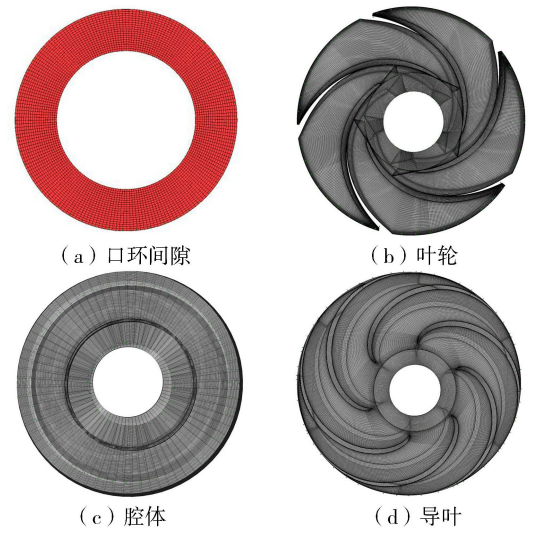


图 2 计算域网格

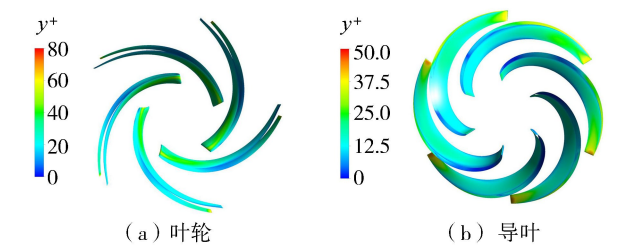


图3 叶轮和导叶的 y^+ 值

表1 不同网格节点数时泵模型性能参数

网格节点数/ 10^6	近壁面第一层网格高度/mm	间隙中的径向网格层数	叶片上的最大 y^+ 值	扬程/m	效率/%
2.23	0.025	5	106.32	34.12	44.33
3.83	0.022	10	99.87	33.96	44.47
5.62	0.018	15	88.32	34.07	44.86
7.50	0.012	20	80.15	33.79	44.03
8.90	0.010	25	71.32	33.74	44.07

体计算域网格来进行网格无关性验证,结果如图4所示。由图4可见,随着网格细化程度的不同,扬程和效率也随之出现波动,当网格数达到750万时,其对应的扬程和效率浮动小于1%,且此时与试验扬程值33.02 m、试验效率值43.03%的偏差均较小,为节省计算资源,选用此网格方案进行模拟计算。

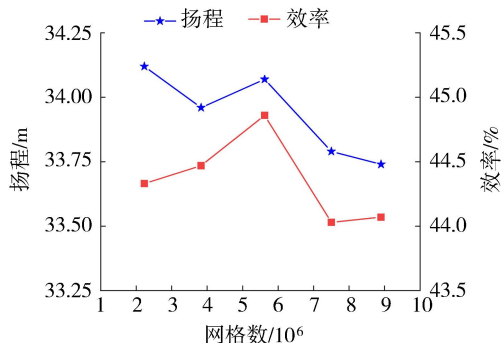


图4 网格无关性验证

1.4 数值模拟方法及边界条件设置

采用计算流体力学软件 ANSYS CFX 对高速多级深井泵全流场进行数值模拟,边界条件设置:入口边界设置为总压进口为一个标准大气压(101.325 kPa),出口边界设置为质量流量大小并随着工况的改变而改变;叶轮的转速为6000 r/min;旋转域和静止域的交界面为“Frozen rotor”;设置各计算域壁面的表面粗糙度为0.03 mm 来与实物模型更加贴合,口环间隙与叶轮、叶轮与腔体的相交面设置为动-静交界面,其余各部件交界面均设置为静-静交界面;收敛精度定义为 10^{-5} 。

多级深井泵级数较多,结构较为复杂,因此在各工况条件下泵内湍流强度较大,流动不稳定性强,叶轮和导叶叶片表面的流动分离现象较为明显,同时口环间隙的存在加剧了叶轮进口处的流动不确定性,因此需谨慎选择湍流模型。SST $k-\omega$ 湍流模型

在标准的 $k-\omega$ 湍流模型基础上改进了涡黏性的定义来考虑湍流主切应力的影响,从而改进了对逆压梯度流动的预测^[18-19]。在多级深井泵数值模拟过程中采用此湍流模型来封闭 N-S 方程可较为准确地预测其内部流动特性,因此本文选择该湍流模型进行数值计算。

1.5 试验验证

为了证明数值模拟的准确性,将本文的泵模型制作样机并进行外特性试验,扬程和效率的模拟与试验结果如图5(图中 Q 为实测点流量)所示。试验表明计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的模拟结果与试验所得的外特性曲线趋势较为一致,说明本文采用的数值模拟方法较为合理,可用于高速多级深井泵的模拟分析。

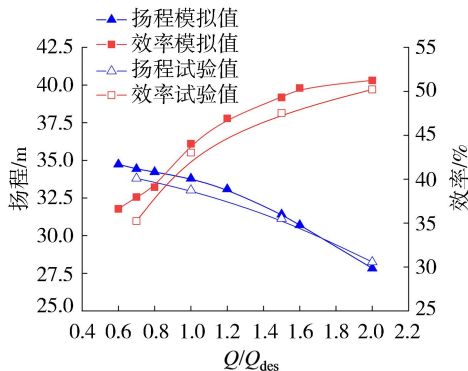


图5 外特性模拟曲线与试验曲线

2 数值模拟结果与分析

2.1 口环间隙尺寸对高速多级深井泵外部特性的影响

图6为不同口环间隙尺寸时的口环泄漏量,可见口环泄漏量随着流量的增大而略微减小,但在大间隙尺寸的大流量工况($1.2Q_{des}$)下泄漏量下降速率增大,而小流量工况($0.8Q_{des}$)下无明显差异;同时,泄漏量随着口环间隙尺寸的增大而增加,当间隙尺寸由0.15 mm 增大至0.35 mm 时泄漏量的增加值明显高于由0.35 mm 增大至0.55 mm 时的增加值,

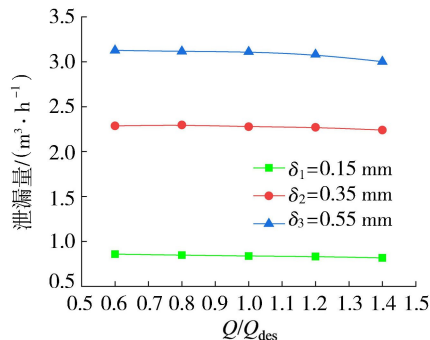


图6 不同口环间隙尺寸时口环泄漏量

说明随着口环间隙尺寸的增大,泄漏量的增加趋势有所减缓。这可能是因为口环间隙尺寸的不断增大导致叶轮内部以及腔体内的旋涡强度也进一步增强,由于腔体内的旋涡覆盖面积更广,阻断了水流的正常流动,因此导致能够泄漏回叶轮进口的流量增值有所降低。

图 7 为不同口环间隙尺寸时泵的外特性曲线,3 种不同口环间隙尺寸下泵对应的扬程、效率和轴功率曲线变化趋势类似,扬程和效率均随着间隙尺寸的增大而减小,轴功率的变化趋势相反;同时在大间隙尺寸下效率的下降趋势有所减缓,这与图 6 中的泄漏量变化趋势相对应。综上所述,口环间隙尺寸对泄漏量和多级深井泵的性能参数影响较大,因此在设计口环间隙时应考虑间隙尺寸。

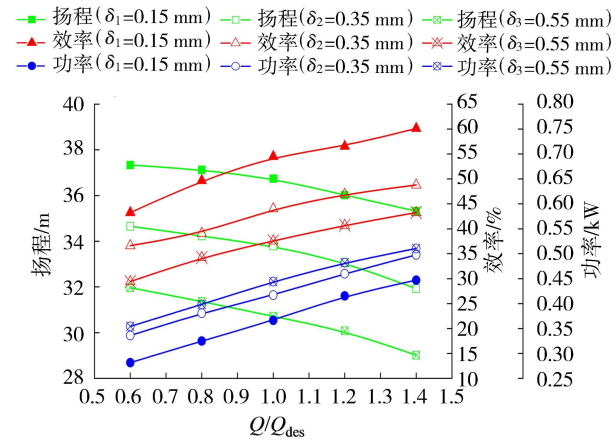


图 7 不同口环间隙尺寸时泵的外特性曲线

2.2 口环间隙尺寸对高速多级深井泵内部流动特性的影响

2.2.1 熵产分析

图 8 为不同口环间隙尺寸泵的总熵产分布,可见,泵的总熵产随着口环间隙尺寸的增大而增大,并且口环间隙尺寸由 0.15 mm 增大到 0.35 mm 时所增加的总熵产明显高于由 0.35 mm 增大到 0.55 mm 时所增加的总熵产;3 种口环间隙尺寸泵的总熵产随流量的变化规律基本相同,均随着流量的增大而减小,说明泵内的流动损失随着流量的增大而减小;口

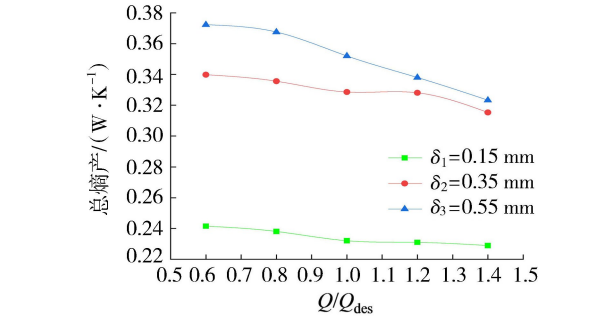


图 8 不同口环间隙尺寸时泵的总熵产

环间隙尺寸越大其内部损失越大,但随着口环间隙尺寸增大这种影响在逐渐弱化。表 2 为设计工况下不同口环间隙尺寸时多级深井泵的黏性耗散熵产和湍流耗散熵产分布,可见,在同一口环间隙尺寸时,湍流耗散熵产远大于黏性耗散熵产,黏性耗散占比比较小;口环间隙尺寸为 0.35 mm 时泵的黏性耗散最大。结合图 8 和表 2 可知,多级深井泵的总熵产受口环间隙尺寸的影响较大,且湍流耗散熵产是泵内能量损失的主要来源,不可忽略。

表 2 设计工况下不同口环间隙尺寸时泵的总熵产分布

δ/mm	黏性耗散熵产/ $(\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$	湍流耗散熵产/ $(\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$
0.15	0.003 48	0.225 89
0.35	0.008 60	0.309 50
0.55	0.004 38	0.327 63

为了进一步研究不同口环间隙尺寸对高速多级深井泵各水力部件中的流动损失影响,表 3 给出了不同口环间隙尺寸泵的各水力部件熵产占比情况。

表 3 不同口环间隙尺寸时泵的各水力部件熵产分布

δ/mm	Q/Q_{des}	熵产占比/%			
		口环间隙	导叶	叶轮	腔体
0.15	0.6	2	20	25	54
	0.8	2	24	21	53
	1	1	29	20	50
	1.2	1	31	20	48
	1.4	1	35	20	44
0.35	0.6	4	11	27	58
	0.8	3	17	25	56
	1	3	20	26	52
	1.2	2	22	27	49
	1.4	2	23	30	45
0.55	0.6	1	13	24	61
	0.8	1	16	26	57
	1	1	19	28	52
	1.2	1	20	31	48
	1.4	1	21	34	44

如表 3 所示,腔体熵产占比始终最大,最高可达 61%,而对同一口环间隙尺寸,腔体的熵产占比均随着流量的增大而不断减小;各部件在不同流量间的熵产差值随着口环间隙的增大也有所增大,这与图 7 相对应,说明口环间隙的增大使得泵内部的流动更加不稳定;导叶的熵产在较小的口环间隙尺寸时占比要比在大口环间隙尺寸时更大;而叶轮的熵产分布情况与导叶相反;口环间隙由于其体积较小因此其熵产占比很小(大致在 1%~4%),且受口环间隙尺寸的变化影响较小,但在 0.35 mm 间隙尺寸时占比有所升高,这可能是由于此时腔体内的流动不稳定导致回流至叶轮进口的流体在汇入正常来流时,发生了更强烈的流动畸变。从图 9 也可以看出,

在 0.35 mm 间隙尺寸时,口环间隙与叶轮进口相交处产生的局部高熵产率区域更加突出,而进出口管内所占的熵产总值都不足 1%,可忽略不计。

2.2.2 内部流动特征

图 9 为设计工况下不同口环间隙尺寸时泵内的熵产率分布,可见叶轮和腔体内均存在局部高熵产率区域,尤其是在口环间隙与叶轮入口交接处;随着口环间隙尺寸的增大,叶轮入口处的高熵产率区域扩大明显,当口环间隙尺寸增大到 0.55 mm 时叶轮流道中部也出现高熵产率区域,但此时口环间隙出口处的高熵产率有所减小;随着叶轮内的熵产率增大,腔体内的熵产率也有所升高,说明口环间隙尺寸的增大恶化了叶轮入口以及叶轮内的流态,但可以推测当口环间隙尺寸增大到一定程度时,尺寸的大小对叶轮入口处的流态影响将逐渐减弱。图 10 为设计工况下不同口环间隙尺寸时泵的绝对速度分布,可见叶轮入口处的高熵产率区域出现明显的旋涡流动,且随着口环间隙尺寸的增大叶轮入口处的旋涡面积不断扩大,叶轮中部的流线弯曲也更加明显;由此得出,随着口环间隙的增大,叶轮和腔体内的流态恶化明显,这也是图 7 中大口环间隙尺寸时泵效率快速下降的主要原因。结合图 9 和图 10 中的熵产率和速度流线的对比分析可以进一步证明熵产率是将流动损失可视化的有效方法。

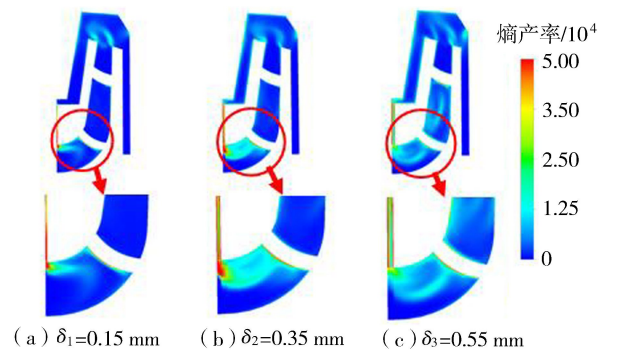


图 9 不同口环间隙尺寸时泵内熵产率分布

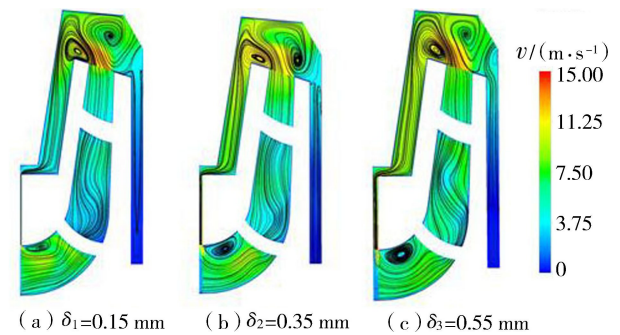


图 10 不同口环间隙尺寸时泵内绝对速度流线

图 11 给出了设计工况下不同口环间隙尺寸时泵内的涡量分布情况,从图中虚线框部分可以看出

3 种模型的腔体内均存在两处明显相似且旋向相反的旋涡流动,同时在 0.35 mm 口环间隙尺寸时腔体内的旋涡强度稍大,在靠近导叶进口处的高涡量区域有所扩大,这也是导致表 3 中 0.35 mm 口环间隙熵产占比略有升高的主要原因。同时随着口环间隙尺寸的增大,叶轮进口处的旋涡强度进一步增强,叶轮内部的涡量也有所增大且覆盖面积更广。总体来看,涡量分布情况与熵产率分布及绝对速度流线分布高度吻合,口环间隙尺寸对腔体内的旋涡特征影响不大,但口环间隙尺寸对叶轮进口和流道内的旋涡强度影响明显。

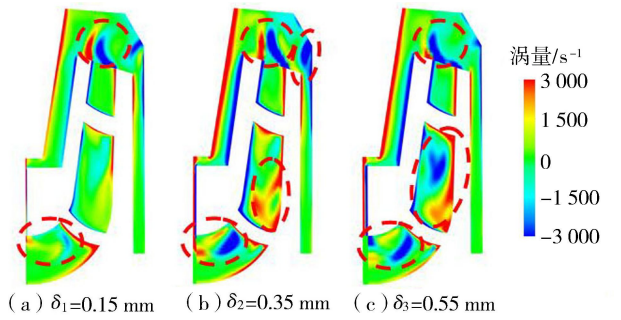


图 11 不同口环间隙尺寸时泵涡量分布

3 结 论

a. 随着口环间隙尺寸的增大,口环泄漏量也在增大,从而导致高速多级深井泵的扬程、效率随之降低;但口环间隙尺寸增大到一定范围时,口环泄漏量的增加会有所减缓。

b. 高速多级深井泵内部总熵产随着口环间隙尺寸的增大而增大,且湍流耗散熵产占主要部分,腔体、叶轮和导叶是泵能量损失的主要区域,口环间隙的熵产最小。随着口环间隙尺寸的增大,叶轮和腔体内的局部高熵产率区域扩大,说明其内部的流态恶化明显,也进一步表明叶轮进口流态受口环间隙尺寸影响明显。

c. 腔体内的旋涡流动明显,且随着口环间隙尺寸的增大腔体内的旋涡特征基本不变,但叶轮进口和叶轮流道内的旋涡强度随着口环间隙尺寸的增大而不断增强,这也是高速多级深井泵内部流动损失的主要来源。

参考文献:

[1] 张启华,施卫东,陆伟刚,等. 新型深井离心泵轴向力的数值计算及平衡分析[J]. 排灌机械,2007,25(6):7-10. (ZHANG Qihua, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Numerical calculation of axial force and balancing on new-type deep well pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery,2007,25(6):7-10. (in Chinese))

- [2] 施卫东,王洪亮,余学军,等.深井泵的研究现状与发展趋势[J].排灌机械,2009,27(1):64-68.(SHI Weidong, WANG Hongliang, YU Xuejun, et al. Development and prospect of deep well pump in China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1): 64-68. (in Chinese))
- [3] ZHAO W G, HE M Y, QI C X, et al. Research on the effect of wear-ring clearances to the axial and radial force of a centrifugal pump [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013, 52(7): 072015
- [4] JIA X Q, CUI B L, ZHANG Y L, et al. Study on internal flow and external performance of a semi-open impeller centrifugal pump with different tip clearances [J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2015, 32(1): 1-12.
- [5] LIU H L, DING J, DAI H W, et al. Investigation into transient flow in a centrifugal pump with wear ring clearance variation [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 693097.
- [6] 赵伟国.基于CFD的离心泵口环间隙流动研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [7] 赵爽.口环间隙变化对离心泵性能影响的数值模拟研究[D].兰州:兰州理工大学,2012.
- [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] 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 59-63. (in Chinese))
- [10] 吴大转,许斌杰,武鹏,等.多级离心泵内部间隙流动与泄漏损失[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(8):1393-1398.(WU Dazhuan, XU Binjie, WU Peng, et al. Internal clearance flow and leakage loss in multi-stage centrifugal pump [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1393-1398. (in Chinese))
- [11] 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 clearance modifications on performance of centrifugal pump [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 211-215. (in Chinese))
- [12] 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,2016,32(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 clearance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 79-85. (in Chinese))
- [13] 高波,王震,杨丽,等.叶轮口环间隙对离心泵性能及流动特性的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(1):13-17.(GAO Bo, WANG Zhen, YANG Li, et al. Effect of wear-ring clearance on performance and flow characteristics of centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(1): 13-17. (in Chinese))
- [14] BASKHARONE E A, WYMAN N J. Primary/leakage flow interaction in a pump stage [J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(1): 133-138.
- [15] LI X J, JIANG Z W, ZHU Z C, et al. Entropy generation analysis for the cavitating head-drop characteristic of a centrifugal pump [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(24): 4637-4646.
- [16] 张帆,袁寿其,魏雪园,等.基于熵产的侧流道泵流动损失特性研究[J].机械工程学报,2018,54(22):137-144.(ZHANG Fan, YUAN Shouqi, WEI Xueyuan, et al. Study on flow loss characteristics of side channel pump based on entropy production [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 137-144. (in Chinese))
- [17] 卢金玲,王李科,廖伟丽,等.基于熵产理论的水轮机尾水管涡带研究[J].水利学报,2019,50(2):233-241.(LU Jinling, WANG Like, LIAO Weili, et al. Entropy production analysis for vortex rope of a turbine model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 233-241. (in Chinese))
- [18] JI L L, LI W, SHI W D. Diagnosis of internal energy characteristics of mixed-flow pump within stall region based on entropy production analysis model [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 117: 104784.
- [19] YE W X, YI Y C, LUO X W. Numerical modeling of unsteady cavitating flow over a hydrofoil with consideration of surface curvature [J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107305.

(收稿日期:2021-09-27 编辑:熊水斌)