

考虑热力学效应的涡轮氧泵口环间隙泄漏特性研究

郑旭, 卜学兵, 孙中国, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为精确分析口环间隙泄漏特性及泄漏流动对液氧泵内流场的影响, 本文基于 SST $k-\omega$ 湍流模型与 High Resolution 算法, 对某涡轮氧泵进行了全尺寸整场数值模拟, 研究了不同流量工况下热力学效应对液氧泵外特性、口环间隙泄漏量及空化特性的影响。研究表明, 在额定工况点附近, B. B. 奥夫相尼科夫公式预测口环间隙泄漏特性相对准确, 偏流量工况下各经验公式预测精度下降; 等体积流量下, 工质为液氧时泵效率较常温水介质高 4%, 口环间隙泄漏量大于水介质下, 且泄漏量差值与流量相关; 等温条件下, 介质温度对口环间隙泄漏量影响较小, 额定工况下高温液氧泄漏损失较大; 考虑热力学效应后, 泵腔口环间隙内的温升随流量减小而增大, 120%~40% 工况下温升约为 1~3 K。液氧泵扬程与效率较等温条件结果略有升高, 口环间隙进出口漏量增大、泄漏量明显减小, 泄漏量减小数值与流量成反比, 最大减小量为 3%, 同时口环间隙内空化加剧。

关键词: 涡轮氧泵; 口环间隙; 热力学效应

中图分类号: V434 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202207016 **文章编号:** 0253-987X(2022)07-0145-11



OSID 码

Leakage Characteristics of Wear Ring Clearance in Liquid Oxygen Turbo Pump under Thermodynamic Effect

ZHENG Xu, BU Xuebing, SUN Zhongguo, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To accurately analyze the leakage characteristics of the wear ring clearance and the influence of the leakage flow on the internal flow field of the liquid oxygen turbo pump, SST $k-\omega$ turbulence model and high resolution algorithm are used for numerical simulation of the pump based on full size and the whole flow field to investigate how thermodynamic effects affect under different flow rates, the external characteristics of the pump, the leakage flow rate of the wear ring clearance, and the cavitation characteristics. The results show that each empirical formula from Ovsyannikov can predict the leakage characteristics accurately near the rated operational conditions while it cannot be so accurate in the case of deviation from the rated conditions. The pump efficiency is higher and the leakage is larger for liquid oxygen compared with normal temperature water at the same volume flow rate, and the leakage difference is related to the flow rate of the pump. In the isothermal condition, the leakage flow rate is little affected by the temperature of the working fluid, and the leakage loss is larger when high temperature liquid oxygen is adopted as the working fluid under the rated operational condition. For thermodynamic effects, the temperature rise in the pump cavity and the wear ring clearance increases with the

收稿日期: 2022-01-20。 作者简介: 郑旭(1997—), 男, 硕士生; 孙中国(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51922085, 51790512)。

网络出版时间: 2022-04-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220411.0925.002.html>

decrease of the flow rate of the pump and is about 1—3 K with the flow rate of the pump growing from 120% to 40%. Compared to the results in the isothermal condition, the pump head and efficiency slightly increase, and the vortex at the inlet and outlet of the wear ring clearance increases, but the leakage significantly decreases. The reduction in the leakage is inversely related to the flow rate of the pump, with a maximum reduction of 3%. Moreover, the cavitation in the wear ring clearance is aggravated.

Keywords: liquid oxygen turbo pump; wear ring clearance; thermodynamic effect

高速涡轮泵用于氧化剂与燃料的输送与增压,是运载火箭、导弹、空天飞机等多类航天器发动机的重要组件。口环密封由于结构简单、高可靠性,是高速涡轮泵内常用的一种密封形式,口环间隙影响涡轮泵的容积损失、轴向力与轴系转子动力学特性等,进而影响涡轮泵主流场状态、水力性能与可靠性。然而,口环间隙尺寸相比于叶轮、蜗壳等主要过流部件非常小,造成其内流试验测量困难,同时也增加了数值计算网格设置、边界层捕捉以及跨尺度模拟等研究难度。因此,采用数值模拟方法开展涡轮泵口环间隙泄漏特性研究,对精确研究涡轮泵的水力性能、内部流动特性与动力特性有着重要的作用。

间隙流动是叶轮机械领域研究的热点和难点,间隙流动不仅降低了泵的容积效率,造成能量损失,而且对泵内流动状态及泵运行稳定性与可靠性产生一定的影响。Childs^[1]对泵腔-口环间隙流道内的扰动流进行了理论分析,开发了一种计算与流体共振相关的特征值与特征向量的算法。Yang等^[2]使用Fluent软件对某双蜗壳泵进行了考虑叶轮口环泄漏量与级间间隙泄漏量的数值计算,针对泵效率进行修正,结果表明考虑泵内间隙的数值计算结果与运行试验结果更加吻合。Li^[3]对某低比转速离心泵开展了试验研究,分析口环间隙与油品黏度对泵性能的影响,发现口环间隙变化时,最高效率点对应的流量、扬程、轴功率、效率都发生明显变化。Liu^[4]等对离心泵进行了非定常数值模拟,针对一个叶片周期,研究了不同口环间隙对泵的流场、压力分布与径向力的影响。Wu等^[5]对某离心泵进行了考虑前后泵腔与口环间隙的数值模拟,发现泵腔间隙内速度与压力分布呈现非轴对称特性。DaqiqShirazi等^[6]使用CFX软件进行数值模拟,研究口环间隙泄漏流动对泵腔内流场与泵效率的影响,发现口环间隙减小时,容积损失降低,但圆盘摩擦损失增大,因此总结口环间隙与泵效率间准确的相关性难度较大。同时,发现泵腔间隙中流体存在相反的边界层分布,口环间隙会影响泵腔内流体的速度 k 值。Zhang等^[7]

通过理论与试验研究,建立了描述泵腔内压力径向分布、口环间隙压降效应与叶轮平衡孔泄漏特性的数学模型,并推荐用于低比转速且带有双口环的离心泵。Yan^[8]等针对水泵-涡轮模型进行数值模拟,研究了口环间隙宽度、密封形式、泵流量对泄漏量及泵内损失的影响。Zheng等^[9]通过数值模拟的方法研究了带有口环间隙的离心泵压力脉动特性,发现间隙区域压力脉动主要受叶频控制,越靠近叶轮出口,压力脉动越剧烈。Yan等^[10]采用McLaury磨损模型对某单级单吸离心泵进行全通道数值模拟,研究离心泵流面在不同口环间隙下的磨损规律,发现随着口环间隙的增大,叶轮内的最大磨损率先增大后减小,在口环间隙为0.15 mm时达到最大值。吴大转等^[11]研究了某高压离心泵流量对口环间隙泄漏量与叶轮出入口损失的影响。徐立群等^[12]对小流量二氧化碳离心叶轮进行了三维黏性CFD分析,对比是否考虑密封泄漏的计算结果发现,设计工况下叶轮等熵效率下降了8.1%,表明密封泄漏流对小流量离心压缩机进行精确的性能数值预测和流场研究有显著影响。赵万勇^[13]等数值研究了低比转速离心油泵叶轮口环间隙宽度对泵腔内流体流动的压力及速度分布的影响。牟介刚等^[14]对不同口环间隙与口环结构型式下的离心泵流场进行模拟,发现锯齿形口环具有良好密封效果且有益于提升离心泵效率。杨从新等^[15]以一台转速为38 500 r/min的离心泵为研究对象,研究前后口环间隙的匹配方案对高转速离心泵性能的影响。贺晓希等^[16]通过试验与Numeca软件数值模拟相结合的方法,研究了叶顶间隙对离心压缩机性能和流动的影响机理,发现随着叶顶间隙增大,压缩机稳定运行工况范围变窄,级效率与压比下降。赵存生等^[17]基于CFD分析了口环间隙对离心泵外特性、叶轮盖板压力分布和速度分布的影响,并与试验数据对比验证。

目前针对泵叶轮口环间隙流动的试验及数值研究,多以常温下的水为介质,数值模拟一般不考虑泵内温度场与热力学效应。航天领域常用低温液氧作

为工作介质,运行温度通常接近其沸点。液氧比热容较小,流动时温度易发生变化,并且饱和蒸汽压随温度变化梯度较大,介质热力学效应明显。高转速涡轮泵内热力学效应可能会对口环间隙内流场、泄漏特性与空化产生较大影响,因此考虑热力学效应对精确掌握口环间隙内的流动特征有重要意义。

本文以某液氧泵为研究对象,建立了包括叶轮口环间隙、诱导轮、离心叶轮、蜗壳的全尺寸整体分析模型,对泵整体划分结构化网格。首先将精确数值模拟结果与经验公式结果进行对比分析,评价了各经验公式,在等温条件模拟下,计算液氧工质下泵的水力性能与口环间隙泄漏特性并与水介质下的模拟结果比较分析,计算不同温度液氧但物性恒定时泵的泄漏量变化规律。最后,研究热力学效应对泵的水力性能、口环间隙泄漏特性与空化特性的影响,进行内部流场分析,加深对口环间隙流动的认识。综上,本文在考虑热力学效应下针对包含泵腔与密封间隙流的液氧泵模型进行全尺寸整场数值研究,对指导经验公式的准确使用以及泵的设计与优化提供技术支撑。

1 计算模型与方法

1.1 计算域模型与网格划分

某涡轮液氧泵设计参数流量 Q 、转速 n 、扬程 H 、效率 η 、功率 P 、比转数 n_s 见表 1,流体域模型如图 1 所示,液氧泵流道包括进出口管道、诱导轮、离心叶轮、蜗壳、前后泵腔及前后密封流道。

表 1 液氧涡轮泵设计参数

Table 1 Design parameters of liquid oxygen turbo pump					
$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	H/m	$\eta/\%$	P/kW	n_s
20.196	16 000	257	70	22.8	70

据设计结果,前口环间隙直径 $D_m=50.7\text{ mm}$,长度 $l=7.5\text{ mm}$,单边径向间隙 $\delta=0.3\text{ mm}$,叶轮口环间隙区域模型如图 2 所示。相关研究表明,叶轮前盖板口环间隙与叶轮后口环间隙对泵内流场的影响程度不同,叶轮前盖板口环间隙对泵性能影响较大^[18-19],因此本文主要研究叶轮前盖板口环间隙对涡轮泵性能的影响。

采用 ICEM 软件对诱导轮、离心叶轮、蜗壳、泵腔及口环间隙等全流道划分六面体结构化网格,诱导轮、离心叶轮的计算网格如图 3 所示,诱导轮流域存在单边 0.25 mm 的叶顶间隙。口环间隙计算网格如图 4 所示,口环间隙径向分布 30 层网格,并且

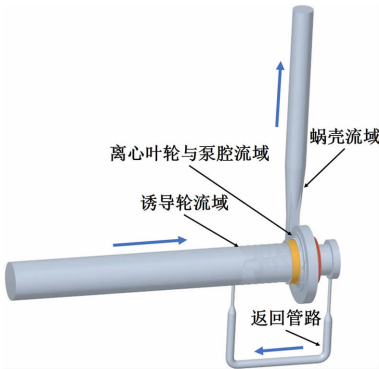
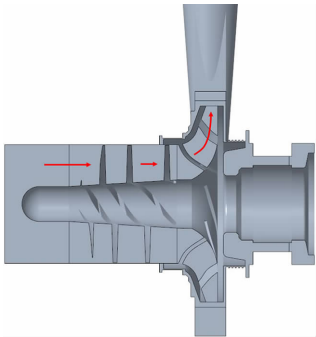
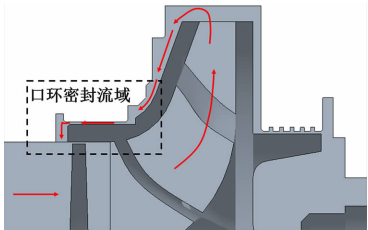


图 1 液氧泵模型
Fig. 1 Model of liquid oxygen pump



(a) 叶轮区域

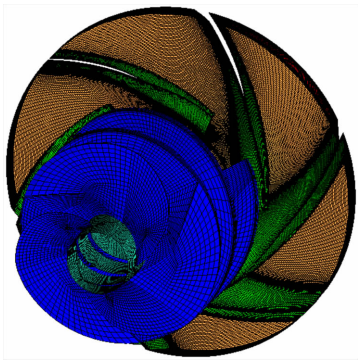


(b) 口环间隙区域

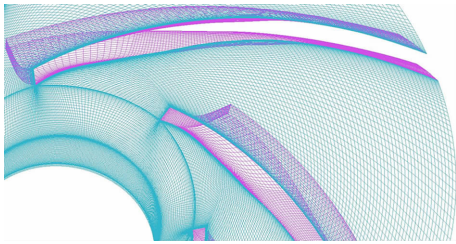
图 2 流道结构图

Fig. 2 Structure diagram of flow passage

保证壁面处网格高度满足 Y^+ 值要求。
网格无关性验证结果如图 5 所示,其中 H 为液氧泵扬程, Q_F 为前泵腔泄漏流量, Q_B 为后泵腔泄漏



(a) 诱导轮与离心叶轮



(b)叶片区域网格细节图
图 3 叶轮流域结构化网格

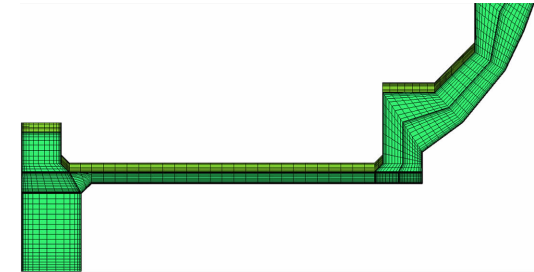


图 4 口环间隙结构化网格
Fig. 4 Structured mesh of wear ring clearance

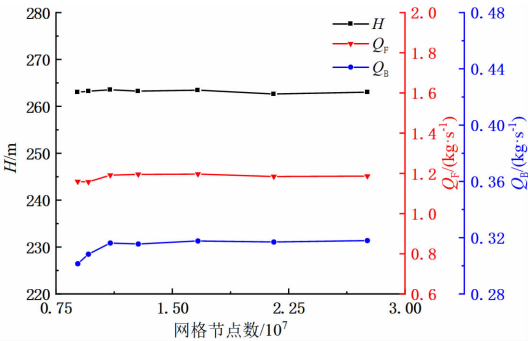


图 5 网格无关性验证曲线
Fig. 5 The validation of mesh independence

流量。为使数值模拟捕捉到更多的流动细节,数值模拟采用 1 650 万网格数,网格最小质量为 0.4。

1.2 数值计算方法与边界条件

采用 ANSYS-CFX 进行定常数值模拟,选用 SST $k-\omega$ 湍流模型和 High Resolution 高阶算法,计算能量方程选用 Total Energy 模型。采用多参考坐标系方法描述内部流动,诱导轮、离心叶轮、前泵腔-口环间隙流道、后泵腔-迷宫密封间隙流道区域采用旋转坐标系,并将物理模型中静止的面包括诱导轮轮盖面、口环间隙泵壳面、迷宫间隙泵壳面设置为反转速度,使其绝对速度为 0,蜗壳、进出口延长段区域采用静止坐标系,动静交界面采用 Frozen Rotor 模型。边界条件包括总温总压入口、流量出口和无滑移固壁边界,采用自动壁面函数求解近壁

区的湍流流动。

2 口环间隙泄漏量对比分析

口环间隙泄漏的体积流量 q_v 取决于密封间隙的通道截面积、密封结构(如径向间隙值、轴向长度、边缘的尖锐程度等)和压差。截取口环间隙处的圆环截面,计算其间隙泄漏量 q_v ,将数值模拟结果与经验公式结果进行对比,如表 2 所示。

表 2 口环间隙泄漏量计算经验公式
Table 2 Empirical formula for leakage flow rate calculation of wear ring clearance

提出学者	泄漏量理论公式
关醒凡 ^[20]	$q_v = \mu A \sqrt{2g\Delta H}$ $\mu = 1/\sqrt{1+0.5\zeta+\frac{\lambda L}{2\delta}}$
Johann Friedrich Gulich ^[21]	$q_v = \pi D_m \delta c_{ax}$ $c_{ax} = \sqrt{(2g\Delta H)/(\eta + \tau \frac{L}{2\delta})}$ $\Delta H = H_p - k^2 u_2^2 / 2g(1 - D_m^2/D_2^2)$
B. B. 奥夫相尼科夫 ^[22]	$q_v = \mu f_y \sqrt{2(p_y - p_1)/\rho}$ $p_y = p_z - \rho u_z^2 / 8[1 - (R_y/r_2)^2]$ $\mu = 1/\sqrt{\lambda l_y/(2\delta_y) + 1.5}$

以水为介质,转速为 16 000 r/min,在泵体积流量为 8 至 24 m³/h 等 5 个运行工况(40%~120%)下,数值计算与经验公式结果对比如图 6 所示,其中 q 为口环间隙泄漏流量。泄漏量随泵流量增加总体呈下降趋势,由于叶轮出口至前泵腔、口环间隙流道内存在复杂湍流脉动,计算结果与经验公式都未呈现单调下降趋势。整体来看 80%~120%流量工况

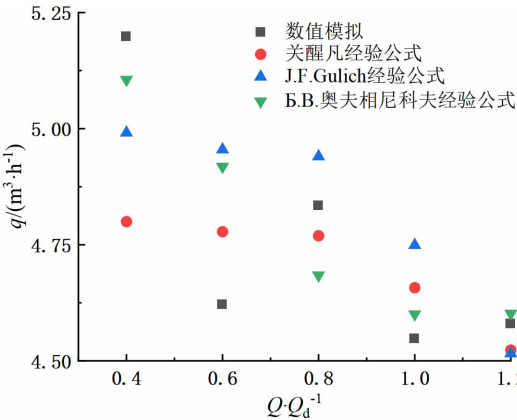


图 6 数值计算与经验公式泄漏量对比结果
Fig. 6 Comparison between numerical simulation and empirical formula of leakage flow rate of wear ring clearance

下,经验公式与精确计算结果更加接近,小流量工况的结果差距是由于泵内流场复杂,损失预测困难所致。

额定流量及其附近工况时,前苏联的 Б. Б. 奥夫相尼科夫公式预测较为准确,偏流量工况时各经验公式与精确计算结果偏差均较大,使用时须适当修正。

3 数值计算结果分析

3.1 等温条件下口环间隙流动分析

当工质为低温液氧时,物性参数^[23]如表 3 所示。在相同体积流量工况下,获得液氧与水介质的泵性能曲线如图 7 所示,两者性能曲线趋势基本相似,扬程-流量曲线均未出现驼峰,在小流量工况出现细微差别,推测是小流量工况流动不稳定所致。液氧介质下的泵效率整体较水介质高约 4%,主要由黏度差别产生。

表 3 液氧物性参数

Table 3 Physical parameters of liquid oxygen				
温度/ K	密度/ (kg·m ⁻³)	黏度/ (10 ⁻⁴ Pa·s)	比定压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
93	1 127.7	1.814 9	1 706.3	0.146 9

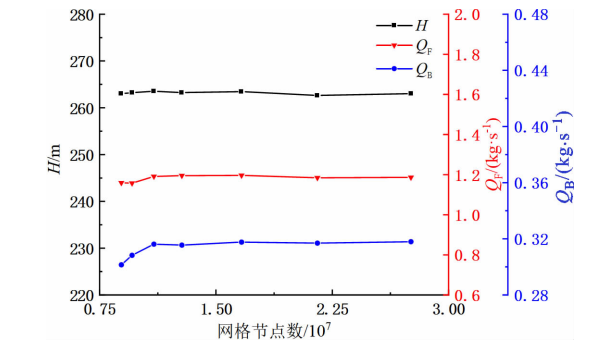


图 7 泵性能曲线对比

Fig. 7 Comparison of pump performance curves

口环间隙泄漏量如图 8 所示,在计算工况内,液氧泄漏量多于水,相同泵出口体积流量时,液氧泄漏损失更大。由于液氧泵扬程大于水泵扬程,液氧泵叶轮进出口压差和口环间隙流道进出口压差均较大,故液氧泵的泄漏流量更大。液氧的黏度较低,口环间隙流道内沿程损失较小,但泄漏损失较大。

由于液氧与水密度不同,采用静压头参量 $H = P/\rho g$ 考察压力分布情况,额定工况下两者的静压头

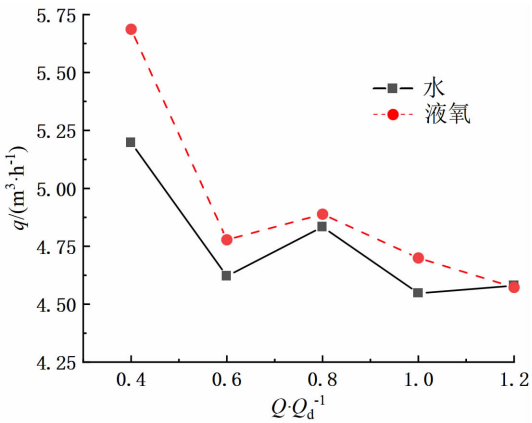


图 8 泄漏量曲线对比

Fig. 8 Comparison of leakage flow rate curves

如图 9 所示。液氧泵叶轮进出口压头差明显高于水泵,而泵腔入口压头近似等于叶轮出口压头,口环间隙出口压力高于离心叶轮入口压力,因此液氧泵口环间隙的泄漏量更大。

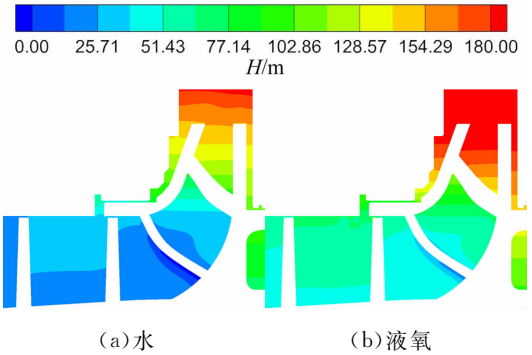


图 9 静压头分布

Fig. 9 Static pressure head distribution

额定工况下的湍动能如图 10 所示。液氧泵泵腔-口环间隙流道中湍动能小于水泵中相应位置,叶轮流道内、叶轮出口、口环间隙流道出口流体湍动能较水泵大,是液氧泵内流体静压头较高与泄漏流量

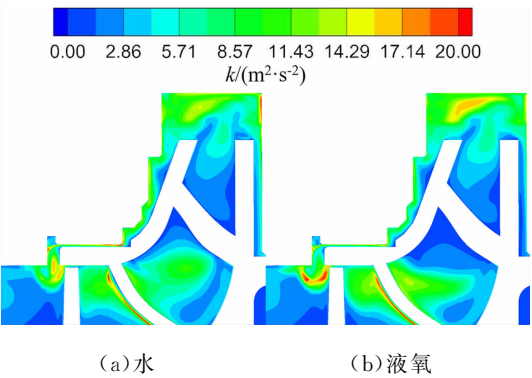


图 10 湍动能分布

Fig. 10 Turbulent kinetic energy distribution

较大所致。液氧泵泵腔-口环间隙流道进出口流动不稳定程度高于水泵,口环间隙泄漏流造成的泄漏损失与冲击耗散损失更大。

液氧的物性参数随温度变化,从而影响间隙泄漏特性。口环间隙流动复杂,泄漏损失特性无法与物性参数线性关联。选择 90 K、95 K、100 K 三种温度进行数值模拟研究,具体物性参数^[23]如表 4 所示。

表 4 不同温度液氧物性参数表
Table 4 Physical parameters of liquid oxygen at different temperature

温度/ K	密度/ (kg·m ⁻³)	黏度/ (10 ⁻⁴ Pa·s)	比定压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
90	1 143.2	1.977 9	1 696.3	0.151 4
95	1 118.0	1.729 3	1 712.2	0.144 2
100	1 091.9	1.531 7	1 734.6	0.136 9

在等温条件模拟下,90 K、95 K、100 K 液氧泵口环间隙泄漏量随泵流量变化如图 11 所示。泵内液氧介质温度不同时,泄漏量变化较小,且各温度下泄漏量随泵流量的变化趋势保持一致,额定工况时高温液氧会产生较大的泄漏损失。

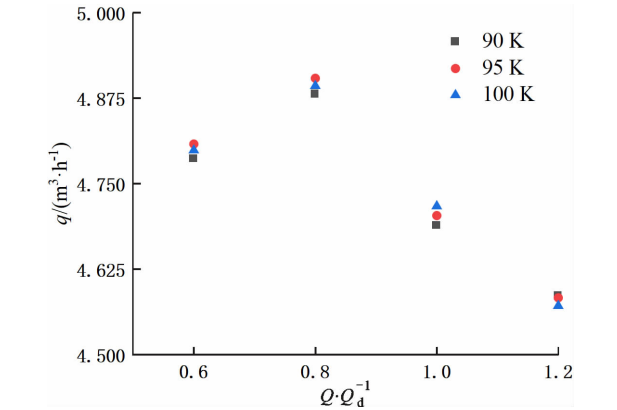


图 11 不同温度下泄漏量曲线
Fig. 11 Leakage flow rate curves at different temperature

3.2 考虑热力学效应下口环间隙流动分析

在高转速、强剪切、多漩涡、高雷诺数等特征下,液氧泵内流实际存在温升,若流道内当地液氧压力低于温升后当地饱和蒸汽压时,会发生空化和气蚀,将对间隙泄漏特性产生显著影响。选择进口温度 90K 液氧进行数值模拟,使用 Total Energy 总能模型求解能量方程,使用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,并与等温条件下的理想情况模拟结果对比分析。

数值模拟中利用 CFX-CEL 函数表示密度、黏

度、比热容、热导率、当地温度饱和蒸汽压等主要物性参数随温度的变化,物性参数与温度的关系利用标准液氧物性参数^[23]采用三次线性公式进行拟合

$$\rho = 2\,150 - 23.81T + 0.208\,2T^2 - 7.59 \times 10^{-4}T^3 \quad (1)$$

$$\mu = 0.002\,27 - 4.79 \times 10^{-5}T + 3.61 \times 10^{-7}T^2 - 9.394 \times 10^{-10}T^3 \quad (2)$$

$$C_p = -6\,269 + 243.92T - 2.504T^2 + 0.008\,65T^3 \quad (3)$$

$$\lambda = 0.28 - 0.001\,4T - 4.45 \times 10^{-7}T^2 + 1.31 \times 10^{-9}T^3 \quad (4)$$

$$p_c = -4.419\,3 + 0.167\,5T - 0.002\,16T^2 + 9.488 \times 10^{-6}T^3 \quad (5)$$

式中: T 为流体当地温度; ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏度; C_p 为流体比定压热容; λ 为流体热导率; p_c 为流体当地温度饱和蒸汽压。公式(1)~(5)的适用范围为 70~150 K,满足模拟温度条件。

为分析泵腔-口环间隙泄漏流道内的温度场变化,沿流向在泵腔-口环间隙流道内设置 8 个监测面,如图 12 所示,监测面 1~3 在泵腔内,监测面 4~8 沿口环间隙流道入口至出口布置。

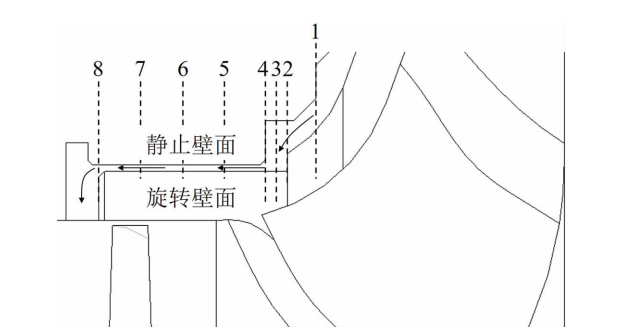


图 12 口环间隙内监测点位置
Fig. 12 The positions of the monitoring points in the wear ring clearance

图 13 为不同流量工况下口环间隙内温度分布。流量工况对泵腔-口环间隙流道内温度场影响较大,泵流量工况越小,泵腔-口环间隙流道内温度越高,80%~120%流量工况下泵腔-口环间隙流道温度比较接近,计算结果中不同流量工况下流道内温升范围为 1~3 K。不同流量工况下,流道内温度变化趋势相似,由泵腔尾端至口环间隙进口段温度缓慢减小,口环间隙流道内温度先减小再增加,存在一个低温极值点。

图 14 为考虑热力学效应与等温条件模拟时泵的性能曲线。是否考虑热力学效应对泵扬程与效率

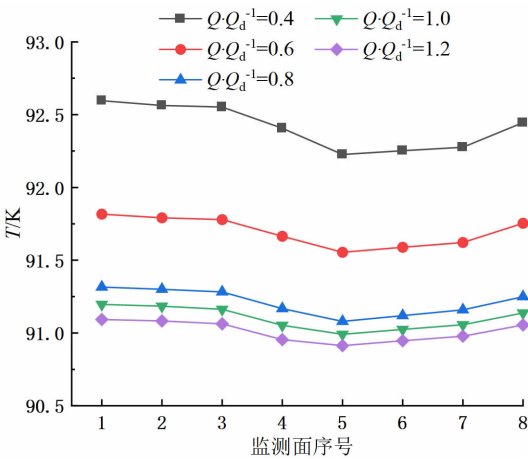


图 13 口环间隙流道温度分布

Fig. 13 Temperature distribution in the wear ring clearance

计算结果影响较小,原因为主流道温升较小,对液氧物性与流场影响较小,而温升大小与泵内结构、转速、入口液氧温度等相关。考虑热力学效应下泵的扬程与效率均略高于等温条件下,是温升后液氧密度及黏度减小,造成流场特征变化和流量工况点微移所致。

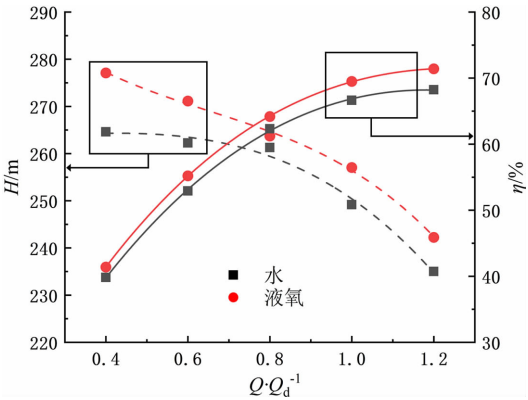
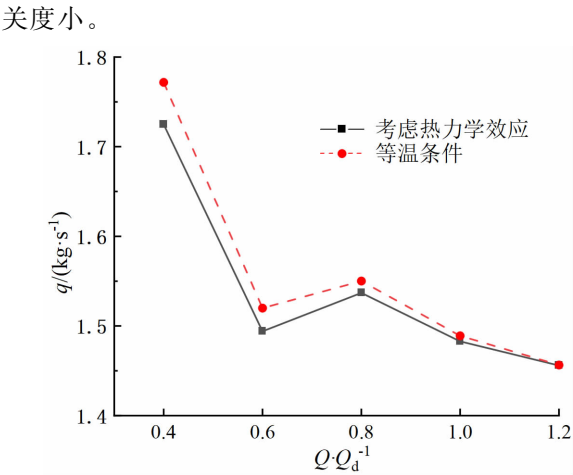


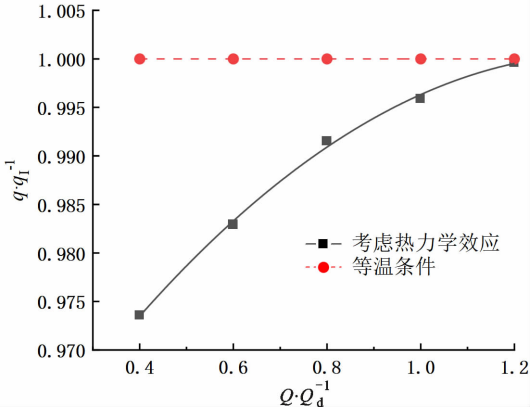
图 14 泵性能曲线对比

Fig. 14 Comparison of pump performance curves

图 15 为考虑热力学效应与等温条件模拟下泵泄漏特性结果,其中 q_l 为各流量工况下等温条件时口环间隙泄漏流量。由于泵腔-间隙流道内温升较大,热力学效应对泵泄漏特性产生明显影响。考虑热力学效应时泄漏量与等温条件模拟下泄漏量的差距随泵流量工况点增大而减小,在 120% 流量工况点下,泄漏量几乎相等。这与图 13 泵腔-口环间隙流道内温度分布规律吻合,小流量工况下泵腔-口环间隙流道内温升较大,热力学效应对泄漏量的影响较大。在不同工况点下,考虑热力学效应模拟时的泄漏量小于等温条件模拟时的泄漏量,数值模拟结果趋势相同,说明泄漏特性变化趋势与物性参数相



(a) 泄漏量

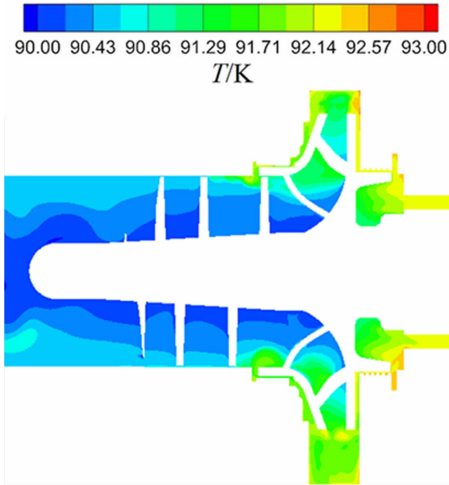


(b) 泄漏量相对比值

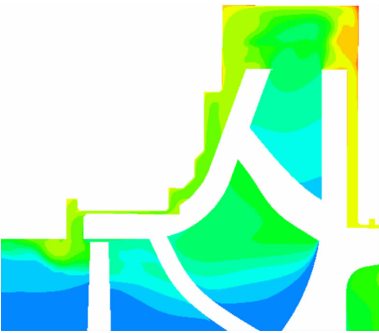
图 15 泄漏量计算结果对比

Fig. 15 Comparison of the results of leakage flow rate

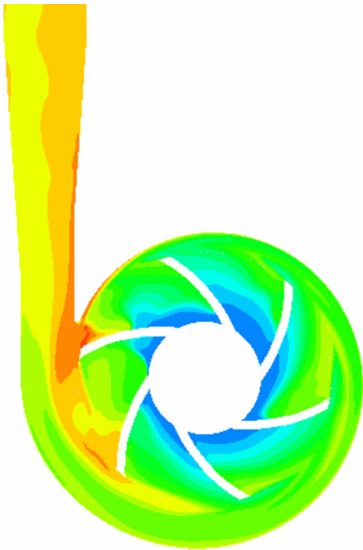
图 16 为液氧泵内流场温度分布,泵内流场的温度由泵入口至泵出口沿流动方向整体是升高的。叶轮内温度场是不均匀的,叶片吸力面温度大于压力面,叶轮与蜗壳的动静干涉增大了流动的不稳定性,



(a) 泵轴截面



(b)泵腔-口环区域



(c)叶轮中截面

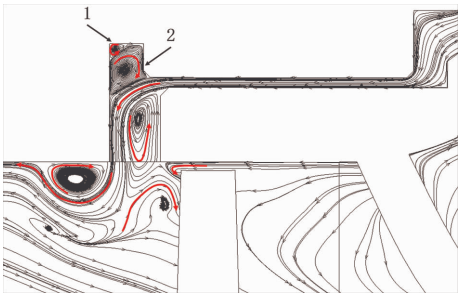
图 16 液氧泵内温度场分布

Fig. 16 Temperature distribution of liquid oxygen pump

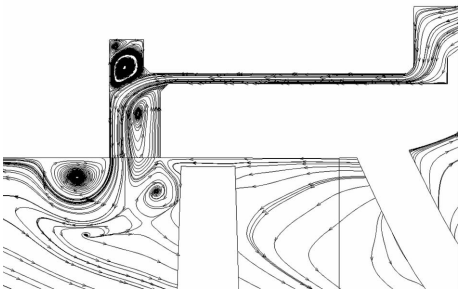
造成了蜗舌区域的局部大温升。泵腔口环间隙内边界层的温度高于主流区,泵壳侧的温度大于轮盖侧,口环间隙内的高温流体流入离心叶轮入口位置,在口环间隙出口区域形成局部高温。对比流线图 17 可知,高温区域为涡系集中区域,认为漩涡流动与黏性剪切流动是流体升温的主要原因。泵内高温区一般为漩涡与壁面摩擦接触的区域,高速转动的漩涡遇到壁面时,黏性力产生更大的能量耗散,流体温度升高。

图 17 为口环间隙内流线分布,口环间隙内的高速流体流动至叶轮入口时遇到低速流体,发生碰撞冲击、逆向掺混、同化作用过程^[24]。口环间隙流道出口的大尺度复杂漩涡严重影响离心叶轮的进口流场,改变流体的流动进口角,增大流动损失。口环间隙内的漩涡造成了流体的能量耗散,起到了强化流阻密封的作用。流道内存在多组对涡,如涡 1、2(见图 17(a)),对涡相互碰撞、摩擦、冲击,亦增大了能

量耗散,造成流体升温。



(a)考虑热力学效应



(b)等温条件

图 17 不同条件下流线轨迹

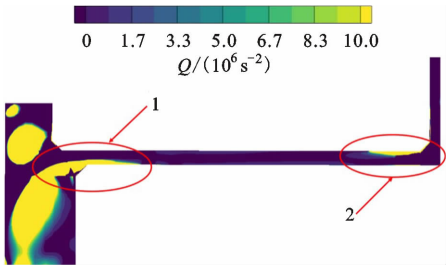
Fig. 17 Streamline at different conditions

为更加清楚的分析口环间隙流道内的涡系分布与涡量强弱,应用 Q 准则分析流场内涡量分布

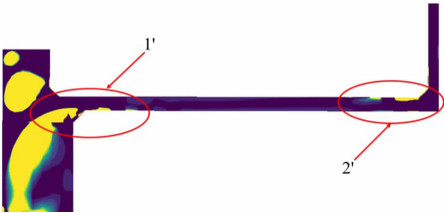
$$Q = -\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6)$$

图 18 为口环间隙流道内的涡量分布,口环间隙内的涡系主要分布于倒角、圆角等角区。计算考虑热力学效应时,口环间隙流道入口及出口处涡量分布大于等温条件下相同位置涡量。考虑热力学效应时口环间隙流道进出口流场涡量更大导致了流道内流动更紊乱,增大了流体流动的阻力,减小了泄漏流量,与泄漏量数值模拟结果相符合。

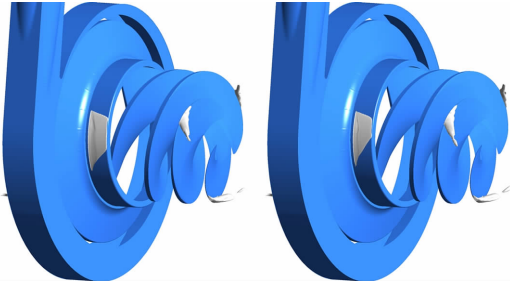
图 19~22 为泵内空化状态与口环间隙内空化模拟结果,涡轮泵内空化主要分为两部分,分别位于诱导轮叶片前缘与口环间隙内部。



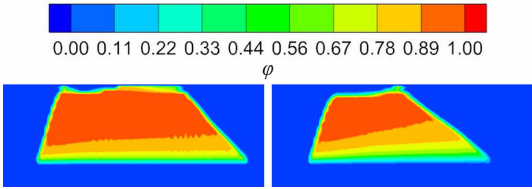
(a)考虑热力学效应



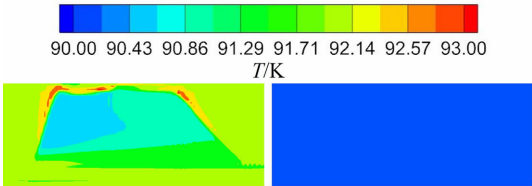
(b)等温条件
图 18 不同条件下涡量分布



(a)考虑热力学效应 (b)等温条件
图 19 空化状态分布
Fig. 19 Cavitation distribution

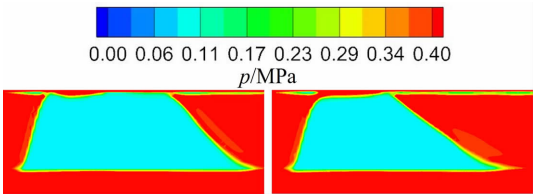


(a)考虑热力学效应 (b)等温条件
图 20 口环间隙内空化体积分数分布
Fig. 20 Distribution of cavitation volume fraction in the wear ring clearance



(a)考虑热力学效应 (b)等温条件
图 21 口环间隙内温度分布
Fig. 21 Distribution of temperature in the wear ring clearance

诱导轮前缘局部压力低于临界空化压力,产生局部空化。由图 20 可知,考虑热力学效应模拟时口环间隙内空化体积与气体高体积分数区域均高于等温条件模拟下。由图 22 可知,口环间隙内发生空化主要原因是流道内存在低压区域,考虑热力学效应时流道内低压区增大。口环间隙内低压区增大主要



(a)考虑热力学效应 (b)等温条件
图 22 口环间隙内压力分布
Fig. 22 Distribution of pressure in the wear ring clearance

为温度引起液氧物性变化导致的,且温度升高导致饱和蒸汽压力升高从而加强了空化,空化加强程度与涡轮泵转速、口环间隙结构、壁面粗糙度等有关。由图 21 可以看出,口环间隙内空化会影响局部区域温度场变化,由于汽化潜热,空化核心区域会发生温降效应,且空化区域边缘的高温为空化气泡云团与液体涡旋不断摩擦导致的,高温出现在口环间隙出口侧。口环间隙流道内空化区域并未沿圆周均布或轴对称分布,主要分布在口环间隙流道内蜗舌一侧,与叶轮与蜗壳动静干涉相关。

口环间隙流道内发生空化,会导致口环间隙内流场流动急剧紊乱及不稳定,形成的空泡团也会阻碍泄漏流动,导致泄漏流量的减小。口环间隙流道内发生空化也会对泵产生消极的影响,造成叶轮盖板外侧汽蚀,以及引发压力脉动导致泵振动增强,并且影响轴向力平衡。口环间隙流道内空化程度与泵转速、泵腔-口环间隙结构、液氧入口温度等条件相关,通过改变口环间隙结构降低口环间隙内的空化程度对涡轮泵的安全、高效、平稳运行是有益的。

4 结 论

为研究考虑热力学效应对涡轮氧泵叶轮口环间隙流动与泄漏特性的影响,本文建立了包含口环间隙、诱导轮、离心叶轮、蜗壳的全尺寸整体分析模型,基于 CFX 的 High Resolution 高阶算法,进行液氧泵内流场数值模拟,分析了液氧泵的内流场流动结构,得到泵在等温条件与考虑热力学效应下的水力性能、口环泄漏特性与空化特性,具体结论如下。

- (1)在额定工况点附近,Б. Б. 奥夫相尼科夫公式预测口环间隙泄漏特性较关醒凡公式和 Gulich 公式更加准确。在偏流量工况时,经验公式之间及与精确计算结果间偏差较大,预测精度明显下降。
- (2)在等温条件模拟下,液氧介质泵效率较同体积流量水介质高 4%;口环泄漏量大于水介质且差值与流量工况相关。温度对口环间隙泄漏量影响较

小,额定工况时高温液氧会产生较大的泄漏损失。

(3)考虑热力学效应时,研究发现泵内流体沿流道逐渐升温,泵腔-口环间隙内的温升随流量减小而增大,120%~40%工况下温升约1~3 K。考虑热力学效应,泵的扬程与效率较等温条件下均略有升高,口环间隙进出口涡量增大、泄漏量明显减小,泄漏量减小数值与流量工况成反比,最大减小量接近3%。此外,口环间隙内空化加剧,影响涡轮氧泵的水力性能与稳定性。

参考文献:

- [1] CHILDS D W. Centrifugal-acceleration modes for incompressible fluid in the leakage annulus between a shrouded pump impeller and its housing [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113(2): 209-218.
- [2] YANG Congxin, WANG Xiuyong, CHENG Xiaorui, et al. Hydrodynamically numerical computation and efficiency correction on a supercritical pump with complex double-cases [C]// 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-4.
- [3] LI Wenguang. 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): 014501.
- [4] LIU Houlin, DING Jian, DAI Hanwei, et al. Investigation into transient flow in a centrifugal pump with wear ring clearance variation [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6: 693097.
- [5] WU Yang, CHEN Xiaoping, DOU Huashu, et al. Numerical simulation and analysis of flow characteristics in the front chamber of a centrifugal pump [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(11): 5131-5140.
- [6] DAQIQSHIRAZI M, TORABI R, RIASI A, et al. The effect of wear ring clearance on flow field in the impeller sidewall gap and efficiency of a low specific speed centrifugal pump [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(17): 3062-3073.
- [7] ZHANG Sen, LI Huaxing, XI Deke. Investigation of the integrated model of side chamber, wear-rings clearance, and balancing holes for centrifugal pumps [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, 141(10): 101101.
- [8] YAN Jianru, ZUO Zhitao, GUO Wenbin, et al. Influences of wear-ring clearance leakage on performance of a small-scale pump-turbine [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2020, 234(4): 454-469.
- [9] ZHENG Lulu, CHEN Xiaoping, ZHANG Wei, et al. Investigation on characteristics of pressure fluctuation in a centrifugal pump with clearance flow [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(9): 3657-3666.
- [10] YAN Chaoshou, LIU Jianfei, ZHENG Shuihua, et al. Study on the effects of the wear-rings clearance on the solid-liquid two-phase flow characteristics of centrifugal pumps [J]. *Symmetry*, 2020, 12(12): 2003.
- [11] 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.
- [12] 徐立群, 王志恒, 席光. 迷宫密封泄漏对小流量离心叶轮气动性能影响的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 23-27.
- XU Liqun, WANG Zhiheng, XI Guang. Numerical study on effect of seal leakage on performance of centrifugal impeller with low flow coefficient [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11): 23-27.
- [13] 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.
- [14] 牟介刚, 代东顺, 谷云庆, 等. 叶轮口环结构对离心泵性能及流场的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(6): 1522-1529.
- MOU Jiegang, DAI Dongshun, GU Yunqing, et al. Influences of impeller ring structure on performance and flow field of centrifugal pump [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(6): 1522-1529.
- [15] 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, 2017, 35(1): 18-24.
- [16] 贺晓希, 宫武旗, 邓俊杰, 等. 叶轮叶顶间隙对离心制冷压缩机性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 30-37.
- HE Xiaoxi, GONG Wuqi, DENG Junjie, et al. Influence of impeller tip clearance on the performance of centrifugal refrigeration compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 30-37.
- [17] 赵存生, 韩小溪, 崔哲. 离心泵口环间隙流动特性的数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 159-167.
- ZHAO Cunsheng, HAN Xiaoxi, CUI Zhe. Numerical simulations of flow characteristics of wear-ring clearance in the centrifugal pump [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 159-167.
- [18] 陈鱼, 费振桃, 蔡永雄, 等. 输送清水时口环间隙对离心油泵性能的影响 [J]. 流体机械, 2006, 34(1): 1-5.
- CHEN Yu, FEI Zhentao, CAI Yongxiong, et al. Effect of the clearance of wear-rings on the performance of centrifugal oil pump while handling water [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(1): 1-5.
- [19] 李文广, 费振桃, 蔡永雄. 离心油泵叶轮口环间隙对性能的影响 [J]. 水泵技术, 2004(5): 7-13.
- LI Wenguang, FEI Zhentao, CAI Yongxiong. Effect of clearance of impeller wear rings upon performance of a centrifugal oil pump [J]. Pump Technology, 2004(5): 7-13.
- [20] 关醒凡. 泵的理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [21] GÜLICH J F. Centrifugal pumps [M]. 4th ed. Cham: Springer, 2020.
- [22] ОВСЯННИКОВ Б В, БОРОВСКИЙ Б И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [M]. Москва: Машиностроение, 1986.
- [23] 黄永华, 陈国邦. 低温流体热物理性质 [M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [24] 郑路路. 离心泵口环间隙非定常流动机理研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)