

介质物性参数对核主泵水力性能的影响

吕雪¹, 王秀勇^{1,2}, 杜永峰¹, 汪东山¹, 黎义斌^{1,2}

(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: 为了研究介质物性参数变化对核主泵水力性能的影响, 采用六面体结构化网格, 基于 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型, 在定常计算的基础上对比分析了输送介质分别为清水和液态钠时核主泵水力性能的变化。结果表明: 介质物性参数的变化对泵内速度场的影响较小, 但速度分布的均匀性随介质运动黏度的减小而降低; 与水介质相比, 当输送介质为液态钠时, 核主泵的扬程变化很小, 轴功率的下降幅度大于密度的减小幅度, 因而效率提升明显。

关键词: 介质; 物性参数; 核主泵; 水力性能; 数值模拟

中图分类号: TH137; TH313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-0813(2021)12-0016-05

Influence of Medium Physical Parameters on the Hydraulic Performances of a Nuclear Main Pump

LV Xue¹, WANG Xiu-yong^{1,2}, DU Yong-feng¹, WANG Dong-shan¹, LI Yi-bin^{1,2}

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

Abstract: In order to study the influence of medium physical parameters on the hydraulic performances of a nuclear main pump, the hexahedron structured grid was used, and based on the RNG $\kappa-\varepsilon$ turbulence model, the changes of hydraulic performances of nuclear main pump with clear water and liquid sodium were compared and analyzed on the basis of steady calculation. The results show that the change of medium physical parameters has little influence on the velocity field in the pump, but the uniformity of velocity distribution decreases with the decrease of medium kinematic viscosity. Compared with water medium, when the conveying medium is liquid sodium, the head of nuclear main pump changes slightly, and the decrease amplitude of shaft power is greater than the decrease of density, so the efficiency is improved obviously.

Key words: medium; physical parameters; nuclear main pump; hydraulic performance; numerical simulation

0 引言

随着计算机技术和计算流体动力学(CFD)的发展, CFD技术在泵性能预测和内部流动展示等方面表现出色^[1-2]。性能测试是检验泵类产品水力性能是否达到设计要求的重要方式, 但当泵实际运行于高温、高压、易燃易爆或强腐蚀性等情况下时, 泵的性能测试通常是以常温常压下的清水来代替实际介质, 由于清水和实际输送介质之间在密度和黏度等物性参数上存在

明显差异, 以清水为试验介质得到的性能测试结果能否可靠地反馈实际运行情况, 目前并没有可靠的结论来进行借鉴^[3-4]。因此, 探究输送介质物性参数的变化对泵外特性的影响很有必要。目前已有的研究结果表明, 流体介质密度的变化对泵的轴功率影响较大, 随流体介质密度的增大, 泵轴功率增大^[5-6]; 而泵的扬程和效率主要受流体黏度的影响较多, 随流体介质黏度的增大, 泵扬程降低, 水力效率下降^[7-12]; 并且随着流体介质黏度的增大, 泵内摩擦损失增加且旋涡分布会更加明显^[13-14]。总体来看, 流体介质物性参数的变化对泵外特性以及内部流动均有明显的影响, 目前依然是众多专家学者研究的热点之一^[15-16]。

本文以某型号的核主泵原型样机为研究对象, 基于 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型, 在 FLUENT 数值模拟的基础上, 对比分析输送介质分别是清水和液态钠时核主泵

收稿日期: 2020-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51866009); 国防基础科研计划(JCKY2019427D001)

作者简介: 吕雪(1994-), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事流体机械流场分析及优化设计研究。

水力性能的变化,并从内部流动的角度探究其原因,以期水力性能在模型试验和实际运行之间的关联性提供理论参考。

1 计算模型及网格划分

1.1 核主泵模型

核主泵原型样机的计算域如图1所示,包括叶轮、口环间隙及前后腔体、导叶、进口段、球形压水室。其设计参数如表1所示。

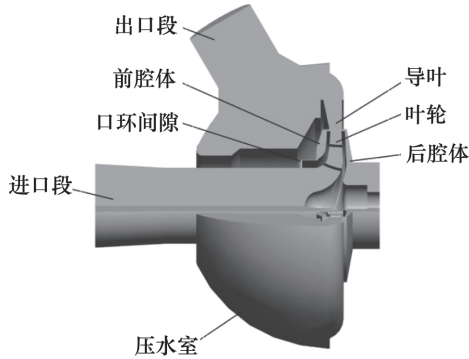


图1 计算域模型

表1 核主泵设计参数

名称	流量 (m^3/h)	扬程 (m)	转速 (r/min)	叶轮叶片 数(枚)	导叶叶片 数(枚)
参数	630	35	990	6	10

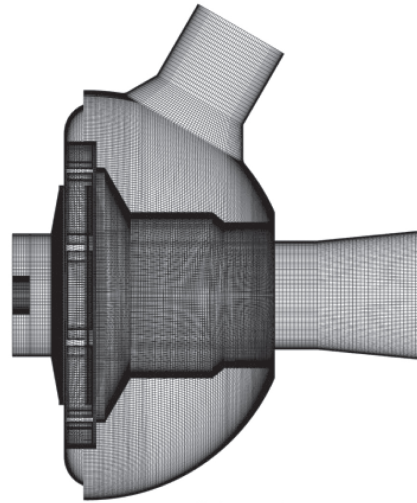
1.2 网格划分

应用ICEM软件对各个过流部件进行六面体结构化网格划分,并对近壁面边界层网格进行加密处理,近壁面第一层网格高度设置为 $\Delta y = 0.3 \text{ mm}$,网格尺度增长比率为1.2。网格划分情况如图2所示。经网格无关性验证,当网格数量达到860万时,扬程和效率的计算结果基本趋于稳定,并且此时无量纲壁面函数 y^+ 值主要分布在30~180区间内,满足RNG $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型 $30 < y^+ < 300$ 的要求^[16]。

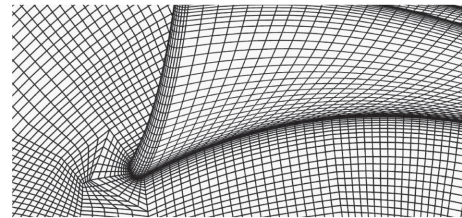
2 数值计算方法

对核主泵原型样机进行全流场耦合计算,假设流动定常,采用RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型和标准壁面函数,压力和速度的耦合采用SIMPLEC算法,动量、湍动能与耗散率运输方程的离散均采用二阶迎风格式。动静区交界面使用interface面进行数据传递,泵进口采用的边界条件为速度进口,出口采用自由出流,壁面条件选择无滑

移壁面。在计算过程中,当泵出口监测面上的静压值变化基本趋于稳定时认为该计算达到收敛条件。



(a) 核主泵网格



(b) 叶轮前缘网格

图2 计算域网格

3 计算结果分析

3.1 介质物性参数变化对水力性能的影响

核主泵进行模型试验时的介质为清水,实际工作时的介质为液态钠,两种介质的物理性质有明显的区别,其中水的温度为 25°C ,密度为 $997.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $0.8949 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,运动黏度为 $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;钠的温度为 310°C ,密度为 $877.62 \text{ kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $0.3382 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,运动黏度为 $0.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。为研究输送上述两种不同的介质时核主泵水力性能的变化,在设计工况下分别进行数值模拟,并计算出泵的扬程、轴功率和效率以及各过流部件的水力性能,如表1所示。在设计工况点,输送清水时核主泵各性能参数的试验结果分别为:扬程 34.98 m ,轴功率 70.35 kW ,效率 85.31% ,对应的相对计算误差分别为 4.97% 、 5.86% 和 -1.33% ,总体来看各性能参数的计算误差基本满足工程要求,尤其效率的计算误差相对较小。

由表2所示核主泵的扬程、轴功率和效率的对比来看,输送介质不同时,泵的扬程差异较小,钠介质仅比水介质的扬程下降了 0.35% ,可见介质物性参数的

变化对扬程的影响较小;泵的轴功率差异较大,钠介质的轴功率比水介质减小了13.57%,而钠介质的密度仅比水介质的密度减小了12.08%,可见钠介质轴功率的降低不仅是因为密度减小了,而且还与流场结构尤其是叶轮内压力场结构发生变化有密切关系;由于两种介质的扬程差异较小,而钠介质的轴功率减小幅度较大,并且由于钠介质黏度的降低从而使导叶和压水室内的水力损失相应减小,所以钠介质的水力效率比水介质整体提高了1.15个百分点,效率提升幅度明显。

表2 设计工况点输送不同介质时核主泵的水力性能

项目	水	钠
泵扬程(m)	36.72	36.59
泵轴功率(kW)	74.73	64.59
泵效率(%)	84.17	85.32
叶轮扬程(m)	39.33	38.98
叶轮效率(%)	90.16	90.90
导叶水力损失(mH ₂ O)	1.44	1.17
压水室水力损失(mH ₂ O)	1.24	1.16

综上所述,输送介质物性参数的变化对扬程的影响较小,对轴功率和效率的影响较大,当输送介质的密度和黏度都减小时,泵的轴功率会明显降低,效率会相应增加。核主泵以水为介质进行的模型试验,其试验结果具有较高的可靠性,当以液态钠为工作介质时,核主泵的扬程基本保持不变,效率会有较明显的提升。

3.2 介质物性参数变化对叶轮速度矢量场的影响

图3所示为输送介质分别为清水和钠时叶轮流道中间截面相对速度矢量场的变化情况,在此只选取单一叶轮流道的有效区间进行定性对比分析,两种介质的流道选取均为同一位置。总体来看,两种介质下叶轮流道内速度矢量场的速度剖面非常相似,没有明显的区别,在流道入口处,过流断面上的速度均匀性良好,速度梯度较小,水力损失相应较低;沿着流动方向,叶片工作面的液体在科氏力的作用下逐渐向叶片背面迁移,液体在叶片背面附近汇集,形成叶片背面附近的液体流速大于工作面的速度分布特征,过流断面上的速度均匀性沿流动方向逐渐变差,水力损失逐渐增大。宏观来看,介质物性参数的变化并没有引起叶轮内相对速度矢量场的明显不同,这也正是介质物性参数的变化对扬程的影响较小的原因。

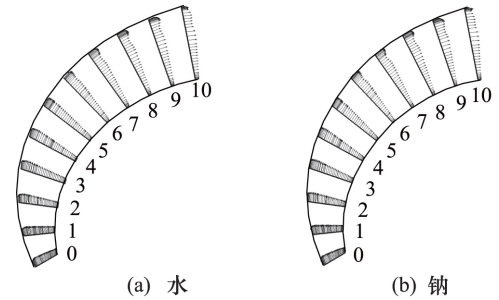


图3 叶轮内相对速度矢量场

为了明确地对比分析两种介质下相对速度矢量场的细微不同,选取图3中叶轮流道的0截线、5截线和10截线上的无量纲速度值(流道内相对流速 U_r 与叶轮入口相对流速 U_j 的比值)分析介质物性参数变化对相对速度大小的影响,如图4所示。总体来看,从细微的角度来分析,介质物性参数的变化对叶轮内相对速度的分布还是有一定的影响,主要体现为钠介质在叶片工作面附近的相对流速略低于水介质,而在叶片背面附近的相对流速则略高于水介质,也就是说钠介质在叶片两侧的流速差略大于水介质,这种速度分布特征一方面会引起泵的扬程略微下降,另一方面导致从叶片背面到工作面的速度梯度增大,流场结构更复杂一些,从而造成更多的水力损失。

3.3 介质物性参数变化对叶轮压力场的影响

为了比较介质物性参数变化对叶轮内压力场分布的影响,以吸入室入口位置的绝对压力值作为计算基准点,将叶片工作面和背面中线处的绝对压力值分别减去吸入室入口位置处的绝对压力值,得到的数值即为叶片表面压力在同一基准下的分布情况。图5所示为叶片工作面和背面的压差系数 C_p 的分布情况。压差系数的计算公式为:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_j^2}$$

式中 Δp —— 叶片工作面与背面的压差,Pa;
 U_j —— 叶轮入口流速,m/s;
 ρ —— 介质密度,kg/m³。

由图5所示来看,不同介质下叶片两侧的压差分布情况大体相同,即沿着流动方向,叶片两侧的压差呈现先增大后减小的趋势,压差最大的区域位于叶片中间位置附近。从不同介质下叶片两侧压差分布的细微区分来看,在叶片前40%的长度范围内,介质物性参数的变化对压力场分布的影响不大;在叶片长度40%~100%的范围内,沿着流动方向,钠介质在叶片两侧的

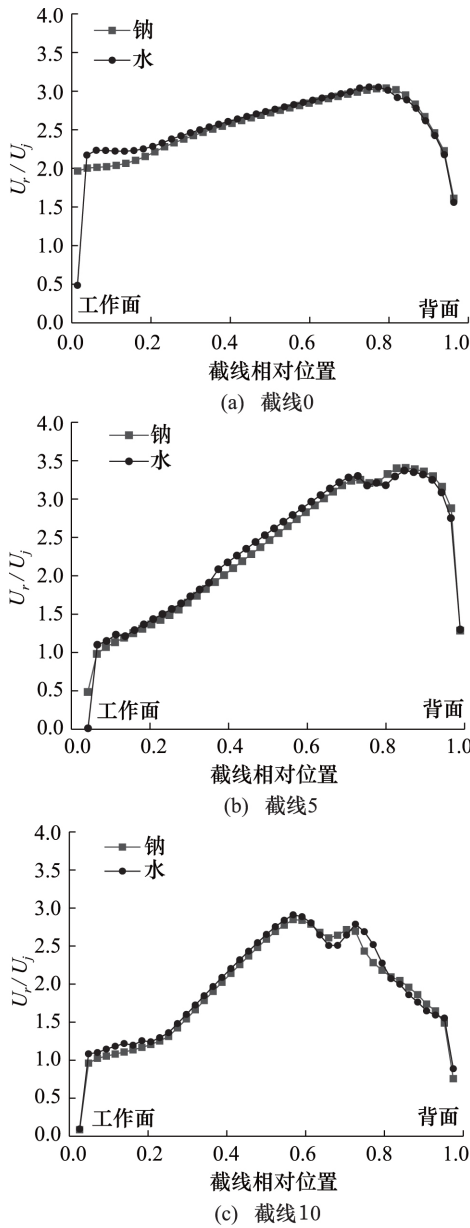


图4 叶轮内相对速度大小

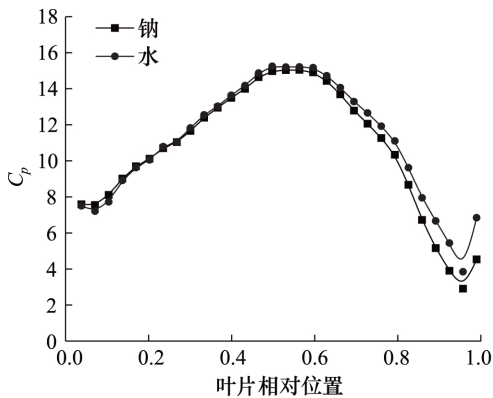


图5 叶片表面压力

压差开始低于水介质,并且越靠近叶片出口,这种区分就越明显,这也正是钠介质比水介质轴功率的减小幅度大于密度减小幅度的原因,从而引起钠介质水力效率的明显提升。

3.4 介质物性参数变化对导叶速度矢量场的影响

图6所示为介质物性参数变化时导叶内速度矢量场的分布情况,在此只选取单一导叶流道的有效区间做定性对比分析,两种介质下的流道选取均为同一个。总体而言,导叶内的速度场分布情况良好,两种介质下的速度场结构比较相似,其中钠介质速度场分布的均匀性比水介质略差,但由于钠介质的动力黏度只有水介质的1/3左右,因而其水力损失比水介质略低。总体来看,介质物性参数的变化对导叶内的速度矢量场有一定的影响,由于液态钠的运动黏度比水小很多,也就是液态钠比水更容易流动,因而其速度场更容易发生变化,流场结构会更复杂一些。

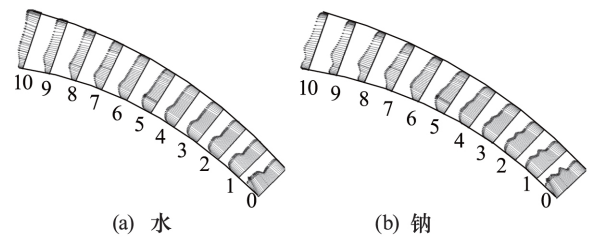


图6 导叶内速度矢量场

3.5 介质物性参数变化对压水室流场的影响

压水室内的湍流运动认为是由不同尺度的旋涡运动相互叠加而成,通过分析压水室的涡量分布能够更加直观地了解其内部流动特征。图7所示为设计工况下输送介质分别为清水和钠时压水室截面上的涡量场分布情况。总体来看,受压水室内做环流运动液体的影响,环形流道左侧区域旋涡运动明显,并且涡量强

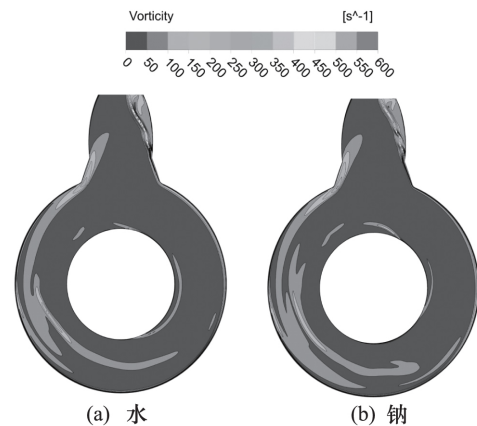


图7 压水室截面上涡量分布

度较大,是压水室内水力损失产生的主要区域;同样的,压水室内液体的环流运动也引起压水室出口附近的右侧区域漩涡运动明显,强度更高。由两种介质的流量场对比来看,钠介质的流场结构更复杂一些,但由于钠介质的动力黏度小,因而其水力损失比水介质略低一些。

4 结论

(1) 与以清水为介质相比,以液态钠为介质时核主泵的扬程变化很小,轴功率降幅较大,效率提升明显;

(2) 介质物性参数的变化,对叶轮、导叶和压水室内速度场的影响较小,但对叶轮内压力场的影响较大;

(3) 介质运动黏度的减小,容易导致泵内的速度场分布特征变得复杂。

参考文献

[1] 喻德辉,陈燕,王超,等. 蜗壳式离心泵外特性仿真与实验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, 2020(01): 181 - 184 + 187.

[2] 郭义航,袁寿其,骆寅,等. 基于CFD的离心泵叶片水力矩非定常特性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(06): 470 - 476.

[3] Liu H L, Wang Y, Yuan S Q, et al. Effects of Blade Number on Characteristics of Centrifugal Pumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(06): 742 - 747.

[4] Cheng W J, Shao C L, Zhou J F, et al. Unsteady Study of Molten Salt Pump Conveying Mediums with Different Viscosities [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 174 - 183.

[5] 巨伟,李志鹏,洪顺军,等. 基于不同密度的流体离心泵性能特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(03): 98 - 103.

[6] 屈春叶,韩念琛. 不同密度流体介质对离心泵的性能影响[J]. 化工机械, 2013, 40(03): 323 - 326.

[7] 刘建华. 黏度对低比转速离心泵性能的影响[J]. 机床与液压, 2019, 47(08): 125 - 129.

[8] 潘中永,曹英杰. 离心泵输送不同黏度流体的数值分析[J]. 排灌机械, 2009, 27(03): 168 - 172.

[9] 杨军虎,雷蕾,张书玮,等. 介质黏度对泵作透平时性能换算的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(07): 553 - 557.

[10] Li W G. Effects of Viscosity on Turbine Mode Performance and Flow of a Low Specific Speed Centrifugal Pump [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(2): 904 - 926.

[11] Shao C L, Zhou J F, Cheng W J, et al. Experimental and Numerical Study of External Performance and Internal Flow of a Molten Salt Pump that Transports Fluids with Different Viscosities [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89(2015): 627 - 640.

[12] 李文广. 液体黏度对旋流泵性能和流动的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017, 36(05): 1 - 9.

[13] Shao C L, Zhao Y. Numerical Study of the Dimensionless Characteristics a Modeling Experiment of a Molten Salt Pump that Transports Viscous Fluids [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2017, 27(9): 2131 - 2153.

[14] Sina Abazariyan, Roohollah Rafee, Shahram Derakhshan. Experimental Study of Viscosity Effects on a Pump as Turbine Performance [J]. Renewable Energy, 2018, 127(2018): 539 - 547.

[15] Zhu J, Banjar H, Xia Z, et al. CFD Simulation and Experimental Study of Oil Viscosity Effect on Multi-stage Electrical Submersible Pump (ESP) Performance [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016, 146: 735 - 745.

[16] 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020: 106 - 107.

《液压气动与密封》杂志2022年征订启事

《液压气动与密封》杂志是中国液压气动密封件工业协会的会刊,致力于服务液压、液力、气动与密封行业及其相关主机行业读者,坚持面向行业、面向生产、面向应用、理论与实践相结合的方针,及时报道国内外最新的液压、液力、气动、密封行业新产品、新技术、新材料、新工艺和经营新理念、管理新经验、发展新趋势,为推动我国装备制造业的发展做出贡献。

欢迎您订阅《液压气动与密封》杂志,我刊为月刊,每期定价20元,全年定价为240元,请直接到您当地邮局柜台办理订阅,可方便准确获取杂志,我刊邮发代号:82-452,邮局咨询电话:11185。

联系人:李绍云

联系电话:010-63172782-8007,15901276823

E-mail: chpsa_fx@163.com