

氟塑料磁力泵流场模拟及轴承端面磨损分析

魏春雨,姜辰尧

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究氟塑料磁力泵中干摩擦轴承端面异常磨损现象,揭示泵内介质流动特性。方法 基于 SIMPLEC 压力-速度耦合算法和 SST $k-\omega$ 湍流模型,应用 FLUENT 软件,进行氟塑料磁力泵全流场数值模拟研究;通过数值计算得出氟塑料磁力泵全流场轴截面、叶轮截面和轴承间隙流道介质流速和压力的分布规律。结果 叶轮压水室流道内压力分布合理,总体压力随着流量的增大而减小;但因进口管道流入的介质同平衡孔回流介质发生碰撞,叶轮流道内介质流动紊乱;同时,干摩擦轴承进出口过大的压力差是造成干摩擦轴承异常磨损的主要原因。结论 研究成果可为氟塑料磁力泵性能优化及解决干摩擦轴承端面异常磨损问题提供理论依据。

关键词 氟塑料磁力泵;全流场;数值模拟;内部流动特性

中图分类号 TH311

文献标志码 A

Flow Field Simulation of Fluoroplastic Magnetic Drive Pump and Wear Analysis of Bearing End Face

WEI Chunyu, JIANG Chenyao

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The overflow part of the fluoroplastic magnetic pump is completely lined with fluorine. the cooling circulating medium flows back to the impeller through the bearing clearance and the balanced hole. In order to study the abnormal wear phenomenon of the dry friction bearing of the fluoroplastic magnetic pump and reveal the flow characteristics of the medium in the pump, based on the SIMPLEC pressure-velocity coupling algorithm and the SST $k-\omega$ turbulence model, the FLUENT software was used to conduct a numerical simulation study of the full flow field of the fluoroplastic magnetic pump. The results show that the pressure distribution in the flow channel of the impeller and volute is reasonable, and the overall pressure decreases with the increase of the flow; but because the medium flowing in the inlet pipe collides with the return medium of the balance hole, the flow of the medium in the impeller flow channel is turbulent. The excessive pressure difference between the inlet and outlet of the friction bearing is the main reason for the abnormal wear of the dry friction bearing.

收稿日期:2020-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51705342)

作者简介:魏春雨(1982—),男,副教授,博士,主要从事建筑流体机械方面研究。

Key words: fluoroplastic magnetic pump; full flow field; numerical simulation; internal flow characteristics

磁力驱动离心泵(磁力泵)是一种使用磁力联轴器实现磁力传动的无泄露泵^[1-2]。磁力泵通过电机驱动外磁转子,通过磁场带动与叶轮泵轴相连的内磁转子转动,将离心泵的动密封结构转化为静密封结构,杜绝了泄露问题。氟塑料磁力泵在磁力泵的基础上将流体过流部件替换为氟塑料材料,消除了普通磁力泵存在的磁涡流现象,同时也极大地提高了泵的耐腐蚀性能。这使得氟塑料磁力泵在石油化工、制酸制碱、电镀、医药等领域被广泛使用。

目前,在企业已批量生产的某型号氟塑料磁力泵在使用一段时间之后出现了干摩擦轴承端面异常磨损的现象,噪声大且对轴承寿命有严重影响。干摩擦轴承端面中出现的磨损,显然与流体经过内部流道时相关部件之间产生的异常轴向力有关。故通过数值模拟对氟塑料磁力泵进行全流场仿真研究是分析解决问题的关键。通过数值模拟来预测离心泵内部的三维流动、优化离心泵的工作性能已经成为研究离心泵的主要方法之一^[3-4]。李社新等^[5]使用非结构网格研究离心泵内流场,发现通过对曲率较小部位加密的非结构网格画法能够满足数值模拟的精度要求。孙静如等^[6]使用 CFX 软件对高温高压磁力泵进行全流场数值模拟,分析了叶轮叶片的压力分布和计算了磁力泵的轴向力。谭林伟等^[7]基于电磁学的数值计算对磁力泵冷却循环回路进行了设计,分析对比了内循环和外循环两种冷却方式。刘建瑞等^[8]使用经验公式计算出磁力泵所需的冷却循环流量,并验证了计算结果的准确性。柴立平等^[9]对氟塑料磁力泵的冷却循环流道及口环径向密封结构进行了创新设计,并通过数值模拟和试验验证了设计成果的可靠性。J. González等^[10]通过对双吸离心泵进行的非

定常数值模拟,研究了叶轮和蜗壳进口流动不稳定性的规律。R. Spence 等^[11]使用 CFX-TASCflow 软件研究了双入口双蜗壳离心泵的压力脉动现象。

目前,尚无对于氟塑料磁力泵全流场的深入研究,针对普通磁力泵的研究也大多数忽略了轴承间隙流域。基于此,针对氟塑料磁力泵在实际运行过程中,干摩擦轴承发生的轴向异常磨损现象,笔者利用数值计算方法对氟塑料磁力泵全流场进行模拟,着重分析轴截面、叶轮界面及轴承间隙流道内介质的流动特性;研究表明:泵内的压力分布较为合理,叶轮流道内介质流动状态紊乱,干摩擦轴承流道两侧压力差产生的轴向力是造成异常磨损的主要原因,研究成果可为氟塑料磁力泵的设计及优化方法提供参考。

1 三维建模及网格划分

1.1 氟塑料磁力泵三维建模

使用 Solidworks 软件对氟塑料磁力泵水体模型进行三维建模。为了得到准确的计算结果,将泵水体模型的进出口端进行适当延伸^[12-13]。笔者研究的氟塑料磁力泵三维建模如图 1 所示。

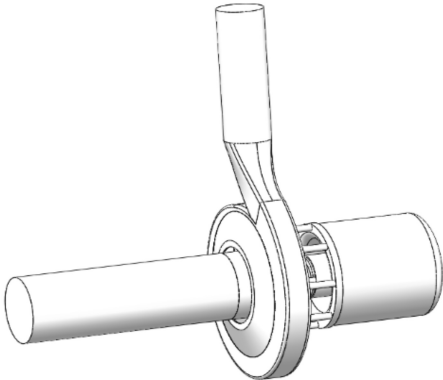


图 1 氟塑料磁力泵全流场三维建模

Fig. 1 Full flow field molding of the fluoroplastic magnetic pump

1.2 网格划分

考虑到氟塑料磁力泵全流场水体模型结构复杂,笔者将使用 ICEM 网格划分软件对氟塑料磁力泵全流场模型进行非结构网格划分^[14-15]。划分网格时,由于氟塑料磁力泵水体模型内部存在较多细小流道,因此选择对不同部件进行分别划分网格。对于流道内流体变化较大,尺寸较小的区域如压水室隔舌部位、轴承间隙流道等进行网格加密^[16]。网格划分完成后,使用 Edit Mesh 工具对网格进行光顺处理,确保总网格质量在 0.3 以上。将各部件网格交界面进行合并后,得到氟塑料磁力泵全流场网格,计算区域网格数目为 2 416 741,如图 2 所示。

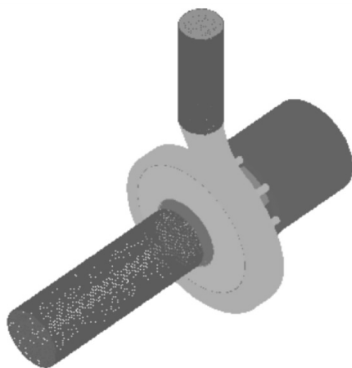


图 2 氟塑料磁力泵全流场网格

Fig. 2 Full flow field grid of the fluoroplastic magnetic pump

2 数值计算方法

2.1 湍流模型

湍流模型的选择会直接影响数值模拟最终结果的准确性。在 FLUENT 提供的众多湍流模型中,SST $k-\omega$ 模型作为 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型的混合模型,同时具备了 $k-\varepsilon$ 模型边界层外流动计算的高精度和 $k-\omega$ 模型近壁面湍流计算的准确性两个优点,对于氟塑料磁力泵水体模型中的小尺寸间隙流动有较好的适应性^[17-18]。因此,笔者选用 SST $k-\omega$ 湍流模型,其湍动能 k 耗散率 ω 方程可表示为^[19]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta' k. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_3 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_3 \omega^2 + 2(-F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (2)$$

加权函数 F_1 的表达式为

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4). \quad (3)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho k}{CD_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2} \right]. \quad (4)$$

$$CD_{kw} = \max \left(2 \rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right). \quad (5)$$

2.2 求解参数及边界条件

将氟塑料磁力泵内部流动视为不可压缩定常流动,使用多重参考系法实现叶轮流域和磁囊流域的旋转运动,旋转流域转速为 2 900 r/min,旋转方向靠右手定则判定。计算模型入口采用速度入口边界,出口采用自由出流边界。入口处速度计算公式为

$$\nu = \frac{Q}{\rho \pi r^2}. \quad (6)$$

各工况下入口速度如表 1 所示。壁面设置中将所有与旋转部件接触的流域壁面设置为旋转壁面,旋转速度与叶轮转速相同。选择 SIMPLEC 压力-速度耦合算法,为提高计算收敛的速度,将压力的亚松弛因子调为 1,其他参数保持默认。

表 1 各工况入口速度

Table 1 The entrance speed of each working condition

流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	速度 $\nu/(m \cdot s^{-1})$
30	1.06
50	1.77
70	2.48
100	3.54

3 氟塑料磁力泵流场模拟结果

3.1 氟塑料磁力泵轴截面流场分析

3.1.1 轴截面速度场分析

轴截面速度分布图如图 3 所示。介质由进口管道进入叶轮,经叶轮叶片旋转做功,介质流入压水室,在压水室和后腔存在的压差

的作用下进入后腔。后腔和联轴器流域内的介质经平衡孔流入叶轮内,同进口管道流入叶轮介质的流动方向相反,两股介质发生碰撞,导致了叶轮内部的介质流动比较紊乱,出现低速区域和漩涡区域。随着泵的流量逐渐增大,泵内介质流动的最大速度逐渐减小,出

口管道及叶轮内部的低速区域和漩涡区域也逐渐减小。当泵的流量达到 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 时,出口管道内介质流态稳定,无明显的低速区域,叶轮内的漩涡区域也明显减小,泵内流动情况有较大改善。

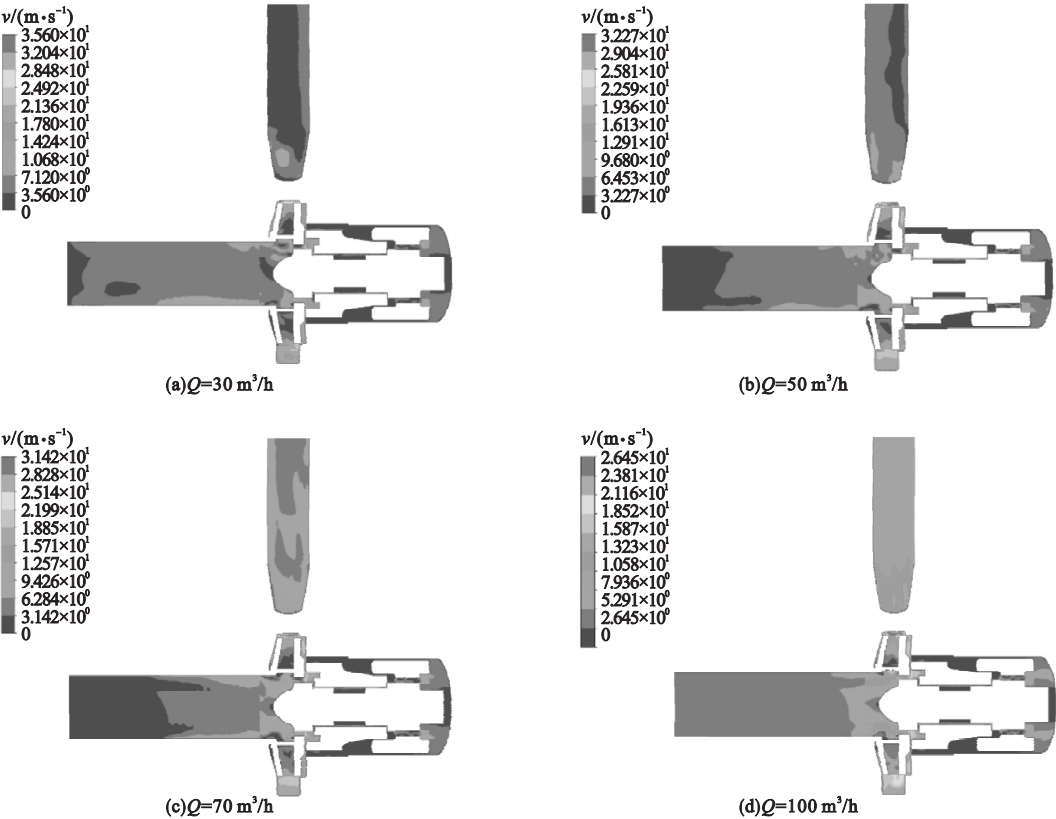


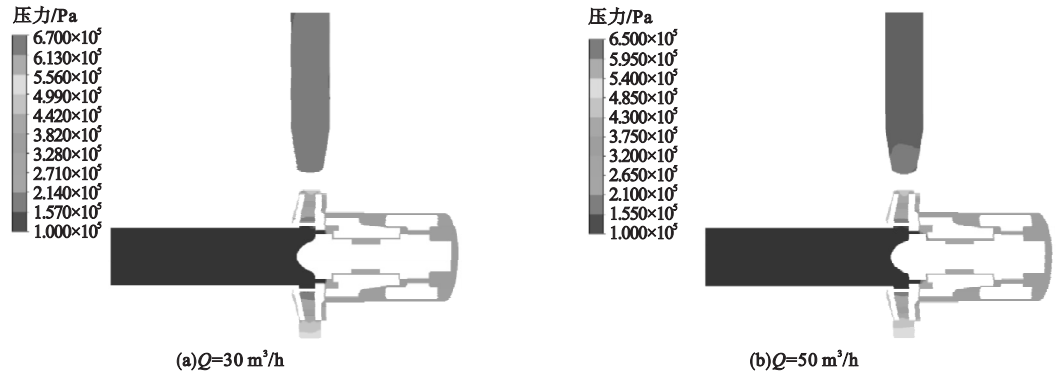
图3 氟塑料磁力泵轴截面速度场

Fig.3 Velocity field at shaft section of the fluoroplastic magnetic pump

3.1.2 轴截面压力场分析

不同流量工况下,轴截面压力分布如图4所示。介质在从叶轮入口到叶轮出口的

流动过程中,介质压力随着叶轮叶片旋转做功呈梯度性增加。介质在从压水室进入后腔,经过隔离套流域、轴承间隙、平衡孔流回



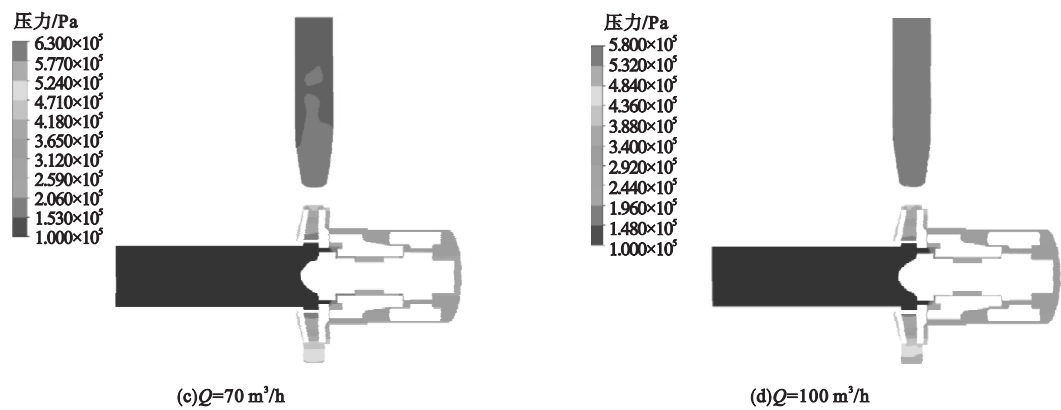


图 4 氟塑料磁力泵轴截面压力场

Fig. 4 Pressure field at shaft section of the fluoroplastic magnetic pump

叶轮内部的过程中,压力逐渐降低。在不同的流量工况下,轴截面的压力分布规律基本相同,随着流量的逐渐增大,内部压力逐渐减小。

3.2 氟塑料磁力泵叶轮截面流场分析

3.2.1 叶轮截面速度场分析

不同流量工况下,叶轮速度矢量图如图 5 所示。由图可知,叶轮叶片中间流域存在

大范围的低速区域,叶轮内介质流动较为紊乱,这是由于经平衡孔回流的介质同进口管道的介质发生碰撞产生漩涡导致了大范围的低速区域。随着流量的增大,叶轮内低速区域减少,介质流动速度增加,介质流动紊乱的情况有所改善。在大流量工况下,叶轮流道内速度分布均匀,介质流动稳定。

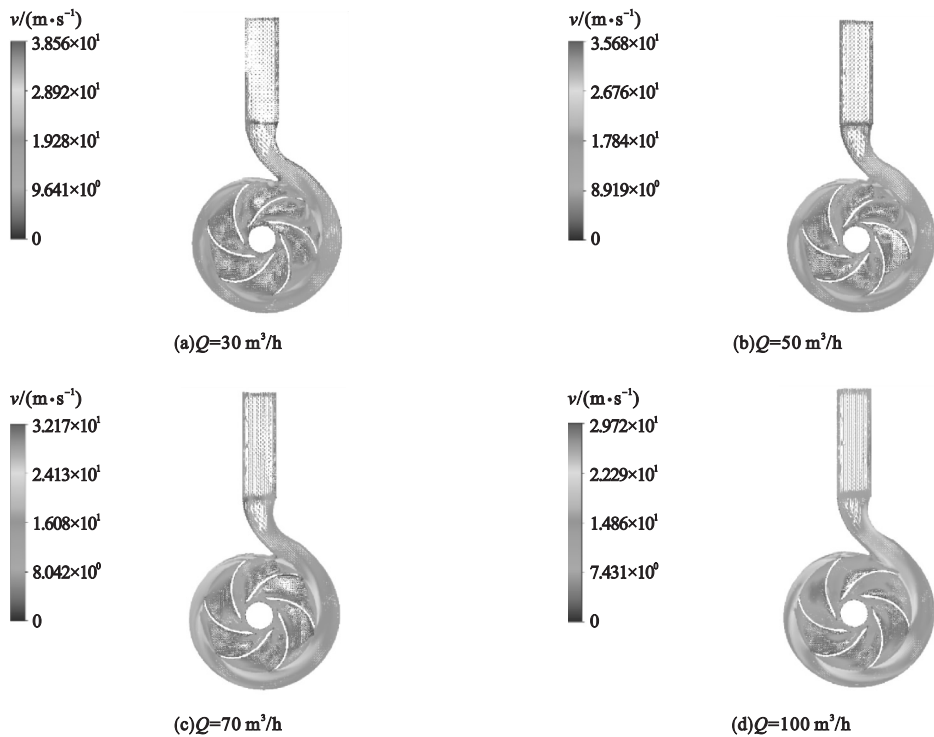


图 5 氟塑料磁力泵叶轮截面速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector field of shaft impeller in the fluoroplastic magnetic pump

3.2.2 叶轮截面压力场分析

不同流量工况下,氟塑料磁力泵叶轮压力分布如图6所示。介质在叶轮入口处压力最低,在被叶轮叶片打入压水室的过程中介质压力逐渐增大,压力在叶轮出口叶片工作面达到最大。在相同半径下,叶轮叶片工作面的压力要大于非工作面。在介质沿着压水室运动的过程中,压力逐渐增大,在压水室出口处介质压力达到最大。不同流量工况下,叶轮和压水室内部压力随着流量的增大而减小。

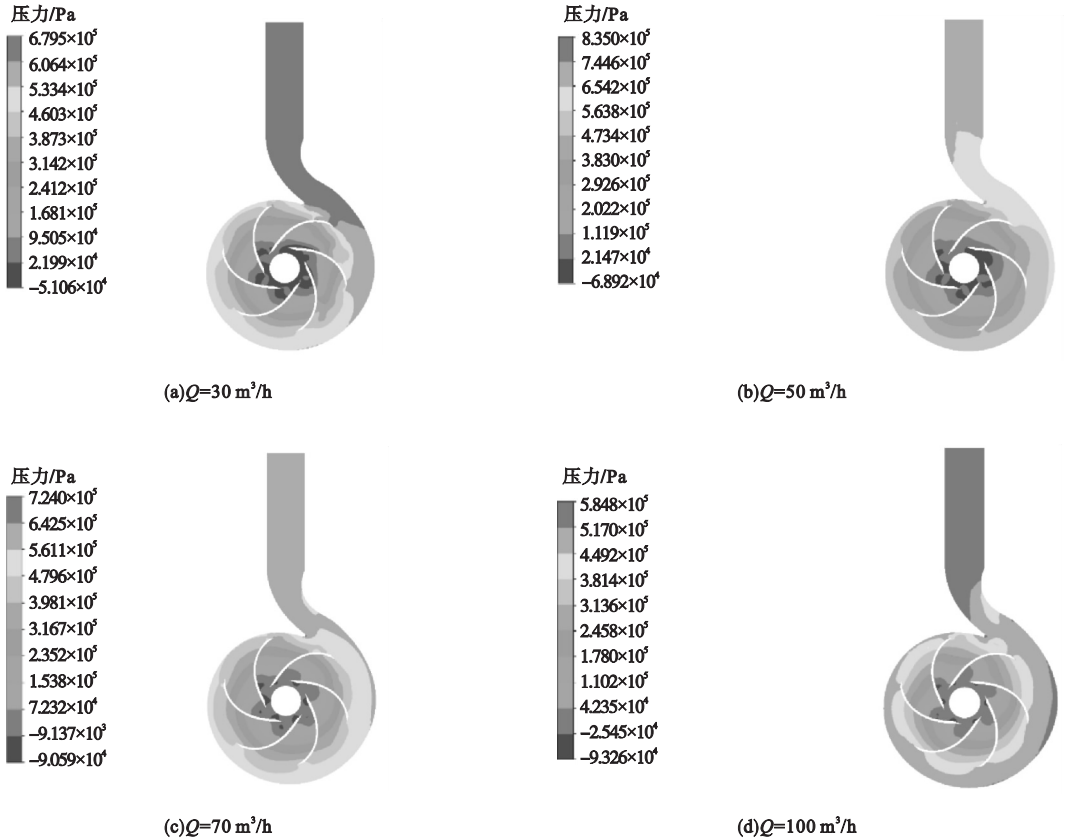


图6 氟塑料磁力轴截面压力场

Fig. 6 Pressure field of shaft impeller in the fluoroplastic magnetic pump

4 干摩擦轴承端面磨损分析

4.1 干摩擦轴承结构模型

氟塑料磁力泵因其全封闭的特点,干摩擦轴承只能通过运输的介质进行润滑和散热。在干摩擦轴承内侧设置的导流槽,不仅可以方便循环介质完成干摩擦轴承的润滑散热工作,同时还能带走内磁转子同介质摩擦产生的热量。研究对象为4圆形导流槽干摩擦轴承,氟塑料磁力泵运行时,两侧的轴承座与叶轮泵轴固定一同旋转,干摩擦轴承可在两个轴承座之间滑动,其结构如图7所示。

面达到最大。在相同半径下,叶轮叶片工作面的压力要大于非工作面。在介质沿着压水室运动的过程中,压力逐渐增大,在压水室出口处介质压力达到最大。不同流量工况下,叶轮和压水室内部压力随着流量的增大而减小。

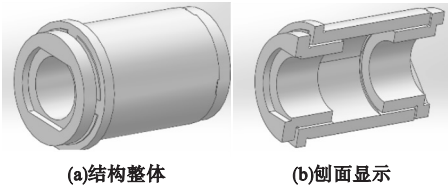


图7 干摩擦轴承结构图

Fig. 7 The structure diagram of dry friction bearing

4.2 轴承间隙流场分析

氟塑料磁力泵在 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下的轴承间隙流道压力分布和速度矢量分布如图8所示。

由图可知,由于轴承间隙流道入口尺寸较小,介质由内磁转子流域进入轴承间隙流道时会出现下降,介质在流经轴承间隙的过程中,受沿程压力损失影响轴承间隙流道内介质压力逐渐降低。轴承间隙流道入口为压力最大处,出口为压力最小处。这就导致轴

承间隙流道进出口之间的最大压力差达到了 0.15 MPa,同时在轴承间隙流道入口处压力下降梯度过大,过大的压力差导致轴承间隙流道入口处的速度矢量极为紊乱,这会对干摩擦轴承施加一个极大的轴向力。

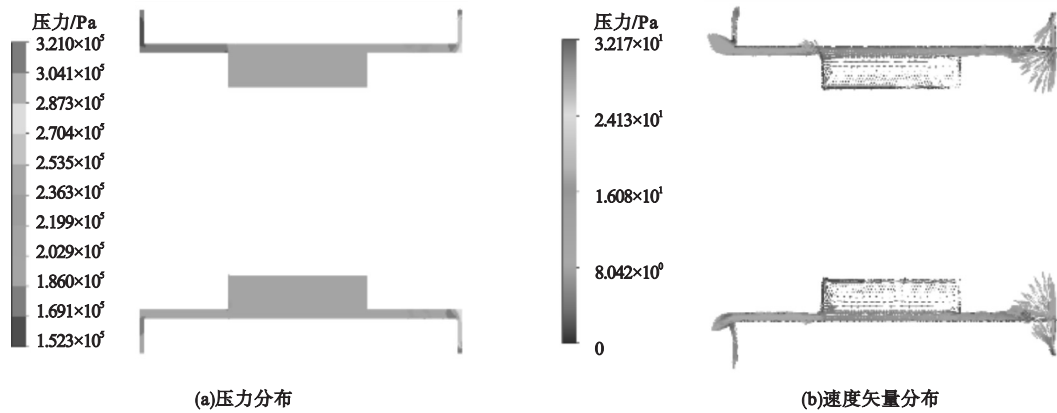


图 8 氟塑料磁力轴承间隙流道压力分布和速度矢量分布

Fig. 8 Pressure distribution and velocity vector distribution of the fluoroplastic magnetic bearing clearance channel

4.3 氟塑料磁力泵轴承磨损机理分析

由于整个轴承间隙流道均尺寸较小,冷却循环介质通过轴承间隙流道时产生的沿程压力损失是干摩擦轴承两侧出现过大的压力差的主要原因。当氟塑料磁力泵开始运输介质时,过大的压力差使得干摩擦轴承在大轴向力作用下与旋转的轴承座发生摩擦,这就造成了干摩擦轴承端面出现异常磨损的现象。可以适当增加干摩擦轴承上导流槽的尺寸或者数量以降低介质在轴承间隙流道运动过程中的沿程压力损失,从而减少干摩擦轴承所受到的轴向力,减轻干摩擦轴承与轴承座之间的摩擦现象。

5 结 论

(1)由氟塑料磁力泵轴截面流场分析可知,介质在压差作用下进入后腔后,在经过隔离套流域、轴承间隙、平衡孔回流叶轮内部的过程中,压力逐渐降低;由于叶轮进口处介质同平衡孔回流介质发生碰撞,产生漩涡和低速区域。

(2)叶轮进口处介质压力最低,随着圆周半径的增加,叶轮介质压力呈阶梯形增长。同圆周半径下,叶轮工作面压力大于非工作面。

(3)干摩擦轴承进出口的压力差是造成干摩擦轴承端面异常磨损的主要原因,可以通过降低轴承间隙流道沿程压力损失的方式加以改善。

(4)笔者得到了轴承部件端面磨损的机理,为解决实际问题提供了理论依据。

参考文献

[1] 张毓. 磁力联轴器的设计及涡流损耗研究 [D]. 杭州:浙江大学,2013.
(ZHANG Yu. Design of magnetic coupling and study on eddy current loss [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013.)
[2] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.
(GUAN Xingfan. The technical manual of modern pump [M]. Beijing:Aerospace Press, 1995.)
[3] 吴贤芳,冯进升,刘厚林,等. 单流道离心泵定常非定常性能预测及湍流模型工况适用性[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊 1):85-91.
(WU Xianfang, FENG Jinsheng, LIU Houlin, et al. Performance prediction of single-channel centrifugal pump with steady and unsteady

- calculation and working condition adaptability for turbulence model [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(S1): 85-91.)
- [4] 孟根其其格, 谭磊, 曹树良, 等. 离心泵蜗壳内非定常流动特性的数值模拟及分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 183-190.
(MENG Genqiqige, TAN Lei, CAO Shuliang, et al. Numerical simulation and analysis of unsteady flow characteristics in centrifugal pump volute [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(22): 183-190.)
- [5] 李社新, 金晶. 非结构网格离心泵全流场数值模拟研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(2): 210-215.
(LI Shexin, JIN Jing. Numerical simulation of centrifugal pump flow field based on unstructured meshes [J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2016, 35(2): 210-215.)
- [6] 孙静如, 屈晓云, 周以松, 等. 高温高压磁力泵流场模拟及轴向力分析[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 25-30.
(SUN Jingru, QU Xiaoyun, ZHOU Yisong, et al. Flow field simulation and axial thrust analysis of high temperature and pressure magnetic drive pump [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(1): 25-30.)
- [7] 谭林伟, 施卫东, 孔繁余, 等. 磁力泵冷却循环回路的设计及数值模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 84-91.
(TAN Linwei, SHI Weidong, KONG Fanyu, et al. Design and numerical simulation of cooling circuit in magnetic pumps [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(8): 84-91.)
- [8] 刘建瑞, 王鸿睿. 磁力泵冷却系统的数值模拟[J]. 排灌机械, 2008(4): 26-29.
(LIU Jianrui, WANG Hongrui. Numerical simulation on cooling fluids channel of magnetic pump [J]. Drainage and irrigation machinery, 2008(4): 26-29.)
- [9] 柴立平, 余超, 潘耀东, 等. 新型 CQB-N 氟塑料磁力泵关键技术研发[J]. 人民长江, 2018, 49(20): 101-106.
(CHAI Liping, YU Chao, PAN Yaodong, et al. Research and development of key technology of new CQB-N fluorine plastic magnetic pump [J]. Yangtze river, 2018, 49(20): 101-106.)
- [10] GONZALEZ J, FERNANDEZ O J M, ARGUELLES D K M, et al. Unsteady flow patterns for a double suction centrifugal pump [J]. Journal of fluids engineering, 2009, 131(7): 071102.
- [11] SPENCE R, AMARAL-TEIXEIRA J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump [J]. Computers and fluids, 2008, 38(6): 1243-1257.
- [12] 袁寿其, 王文杰, 裴吉, 等. 低比转数离心泵的多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 46-52.
(YUAN Shouqi, WANG Wenjie, PEI Ji, et al. Multi-objective optimization of low-specific-speed centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(5): 46-52.)
- [13] 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(1): 181-184.
(YU Dehui, CHEN Yan, WANG Chao, et al. Simulation and experimental study on external performance of the volute centrifugal pumps [J]. China rural water and hydropower, 2020(1): 181-184.)
- [14] 刘厚林, 崔建保, 谈明高, 等. 离心泵内部流动时序效应的 CFD 计算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 67-73.
(LIU Houlin, CUI Jianbao, TAN Minggao, et al. CFD calculation of clocking effect on centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013, 29(14): 67-73.)
- [15] 牟介刚, 刘剑, 郑水华, 等. 隔舌对离心泵压力脉动特性及内部流场的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4090-4098.
(MOU Jiegang, LIU Jian, ZHENG Shuihua, et al. Effect of tongue on pressure fluctuation and internal flow in centrifugal pump [J]. Journal of central south university (science and technology), 2016, 47(12): 4090-4098.)
- [16] LI Zikang, DING Hongchang, SHEN Xiao, et al. Performance optimization of high specific speed centrifugal pump based on orthogonal experiment design method [J]. CFD applications in energy engineering research and simulation, 2019, 7(10): 728.
- [17] 杨从新, 杨藤, 刘满. 叶轮直径对双蜗壳离心泵压力脉动特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 139-144.
(YANG Congxin, YANG Teng, LIU Man. The influence of impeller diameter on pulsation characteristics of double volute centrifugal pumps [J]. China rural water and hydropower, 2020(5): 139-144.)
- [18] 高振军, 洪锋, 刘建瑞, 等. 磁力驱动离心泵全流场数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(5): 69-77.
(GAO Zhenjun, HONG Feng, LIU Jianrui, et al. Numerical study on the whole flow field in magnetic drive pump [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2018, 33(5): 69-77.)
- [19] 黎沐雨. 双蜗壳离心泵的水力特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
(LI Muyu. Research on the hydraulic characteristics of double volute centrifugal pump [D]. Chengdu: Xihua University, 2019.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)