

doi:10.3969/j.issn.1008-0813.2021.04.006

# 渣浆泵叶轮轴向间隙流动及泵体动态磨损特性研究

张人会<sup>1</sup> 郭璐明<sup>1</sup> 李家虎<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 襄阳五二五泵业有限公司, 湖北 襄阳 441004)

**摘要:** 为研究渣浆泵开式叶轮轴向间隙流动结构及泵体动态磨损特性, 采用 RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型和离散相模型, 对开式叶轮渣浆泵内非定常固液两相流动进行数值模拟, 分析了叶轮轴向间隙泄漏流及其与主流的相互干扰作用; 建立了渣浆泵泵体动态磨损模型, 由 UDF 函数实现对泵体表面磨损过程的动态模拟, 运用动网格技术实现间隙网格运动区域的动态更新, 分析了泵体的动态磨损特性及泵体表面粗糙度对其磨损特性的影响; 通过引入时间系数法来实现对实际时间周期内的磨损量预测, 根据该模型的实际运行周期内的磨损量对不同时间系数的预测模型进行非线性修正, 建立了基于时间系数法的磨损预测模型, 算例计算结果验证了预测模型的可靠性, 该研究为渣浆泵泵体的磨损寿命的预测提供了一个可行的方案。

**关键词:** 渣浆泵; 间隙流动; 泵体; 动态磨损特性; 研究

中图分类号: TH137; TH311 文献标志码: A 文章编号: 1008-0813(2021)04-0023-07

## Investigation on the Impeller Axial Clearance Flow and Pump Casing Dynamic Wear Characteristics for Slurry Pump

ZHANG Ren-hui<sup>1</sup>, GUO Lu-ming<sup>1</sup>, LI Jia-hu<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China;

2. Xiangyang Wuerwu Pump Co., Ltd., Xiangyang 441004, China)

**Abstract:** In order to study the impeller axial clearance flow structure and dynamic wear characteristics of open impeller slurry pump casing. Unsteady solid-liquid two-phase flow in an open impeller slurry pump was simulated numerically using RNG  $\kappa - \varepsilon$  turbulence model and discrete phase model. The axial clearance leakage flow and its interaction with the main flow were analyzed. The dynamic wear model of slurry pump casing is established. The user defined function was used to simulate the wear process of the pump casing, and the dynamic mesh technique was used to dynamic update the clearance mesh. The dynamic wear characteristics of the pump casing and the influence of roughness on the wear characteristics of the pump casing surface were analyzed. The time coefficient method was introduced to predict the wear in the actual time period. The models with different time coefficients were nonlinearly modified according to the actual wear amount during the operation period of the model. The wear prediction model based on time coefficient method was established. The results of an example verify the reliability of the prediction model. This study provides a feasible scheme for predicting the wear life of slurry pump.

**Key words:** slurry pump; clearance flow; pumpcasing; dynamic wear characteristics; investigation

开式叶轮渣浆泵广泛用输送含有高浓度固体颗粒的固液两相流, 相对于闭式叶轮, 开式叶轮具有较好的无堵塞性能<sup>[1-3]</sup>, 且没有前盖板, 圆盘磨损相对减少。但由于轴向间隙的存在, 在叶片周向及径向压差力作

用下, 存在复杂的泄漏流动。泄漏流与主流相互耦合形成复杂的时空结构<sup>[4-6]</sup>。同时又由于固体颗粒的存在, 使得间隙流动结构及泵体磨损特性更为复杂。

为研究固液两相流动特性及机理<sup>[7-15]</sup>, 国内外学者从数值模拟及试验两方面展开了深入研究。钱忠东等<sup>[10]</sup>采用欧拉拉格朗日多相流模型模拟了离心泵内水沙两相流运动, 得到不同叶片头部形状下叶片泥沙磨损强度的分布及变化规律; 刘建瑞等<sup>[11]</sup>通过对固液两相流场进行耦合计算, 得到固相颗粒不同粒径、不同体积分、不同密度以及不同流量时的固相浓度分布, 分

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0200901); 国家自然科学基金项目(51979135, 51469014)

作者简介: 张人会(1977-) 男, 江西都昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械内部流动及性能优化。

析了外特性的变化规律。汪家琼<sup>[12]</sup>等采用 Particle 模型对固液两相流离心泵内部流场进行数值模拟,研究其内部固液两相的流动特性,并重点分析固体颗粒在过流部件壁面处的滑移速度和体积分数。在渣浆泵磨损的实验研究方面,陶艺等<sup>[13]</sup>搭建渣浆泵磨损试验台进行磨损试验,分析了叶轮各部位磨损产生的原因;朱祖超<sup>[14]</sup>等通过快速磨损试验,得到了叶轮磨损部位的分布情况;刘娟<sup>[15]</sup>等采用高速摄影技术,研究了离心泵叶轮流道内固液两相流中固体颗粒的运动轨迹及规律,分析了固体颗粒的粒径大小、密度、进口参数以及运行工况参数对颗粒运动轨迹的影响规律。

由于渣浆泵的磨损特性随时间变化呈现较强的非线性关系,传统分析方法难以实现实际磨损量及磨损寿命的预测,本研究建立了流道边界的磨损模型,并采用动网格方法进行动态耦合分析,建立了基于时间系数法的磨损预测模型,为渣浆泵泵体磨损寿命的预测提供的理论依据。

## 1 数值计算与分析

### 1.1 模型泵主要参数

选取由襄阳五二五泵业有限公司的 LCF 100/350 型化工渣浆泵为研究对象,主要参数分别为流量  $Q$  为  $136 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H$  为  $45 \text{ m}$ ,转速  $n$  为  $1480 \text{ r}/\text{min}$ ,比转速  $n_s$  为  $60$ 。叶轮为半开式叶轮,叶片数  $Z$  等于  $6$ ,叶轮进口直径  $D_j$  为  $132 \text{ mm}$ ,叶轮出口直径  $350 \text{ mm}$ ,叶片出口宽度  $b_2$  为  $73.5 \text{ mm}$ ,开式叶轮与泵体间的轴向间隙为  $1 \text{ mm}$ 。

### 1.2 计算模型

计算域包括进口段、轴向间隙、叶轮及蜗壳 4 部分,如图 1 所示。

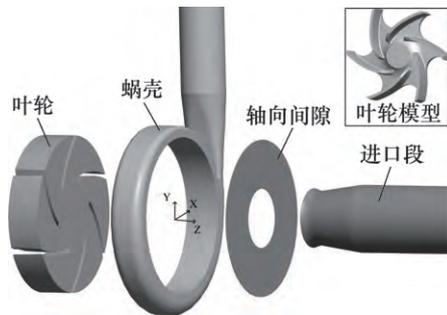


图 1 模型泵计算域

为提升计算的稳定性,对叶轮进口段以及蜗壳出口段进行适当延长。采用结构化网格对整个计算域进行离散。为精确捕捉开式叶轮轴向间隙内的流动结

构,在叶轮轴向间隙内设置 20 层网格,并向叶轮内逐渐过渡,将与间隙接触的叶轮第一层网格设置为  $0.05 \text{ mm}$ ,间隙内细网格与叶轮内粗网格之间均匀过渡,其相邻网格尺寸比例为  $1:1.2$ ,如图 2 所示。综合考虑计算精度和计算量经网格无关性检查,最终将网格总数定为 480 万,采用 SIMPLE 压力速度耦合算法,非定常计算时间步长为  $0.0001 \text{ s}$ 。选择速度进口边界条件,按照额定流量  $136 \text{ m}^3/\text{s}$  计算。采用 RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型和 DPM 固液两相流模型来进行数值模拟,采用滑移网格方法处理叶轮的旋转区域。根据铸铁的砂型铸造表面粗糙度范围,取壁面粗糙度为  $0.2 \text{ mm}$ 。介质为固相浓度  $7\%$  石灰石浆液,粒径为  $0.15 \text{ mm}$ ,不考虑固相和液相的相变。

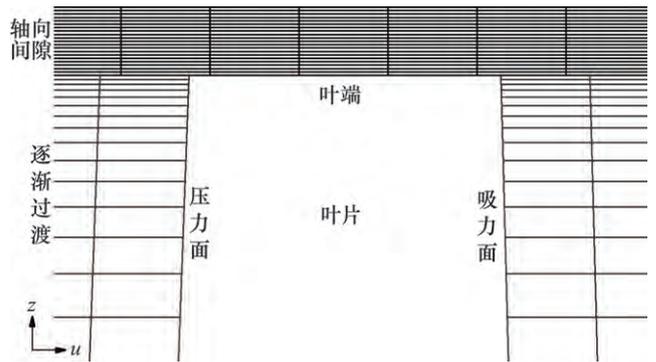


图 2 轴向间隙处网格

### 1.3 数值计算分析

#### 1) 外特性曲线

由于模型泵出厂试验采用清水介质进行试验,先进行数值模拟外特性的对比分析。图 3 为泵外特性模拟值与实验值对比曲线。

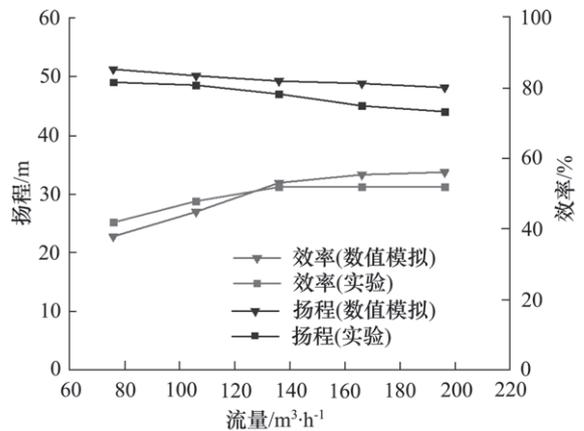


图 3 泵外特性曲线对比

如图 3 所示,实验特性曲线与数值计算的外特性曲线趋势基本一致但存在一定误差。扬程的最小误差

为 2% ,最大误差为 9% 。效率的最小误差为 1.5% ,最大误差为 8% 。

2) 渣浆泵内流场分析

叶轮中间截面与轴向间隙中间截面上的压力分布对比如图 4 所示。开式叶轮轴向间隙内压力场分布与叶轮内压力分布规律基本一致 ,由于叶片的作用叶轮内叶片工作面与背面间的压差较大。图 5 为轴向间隙中间截面上的速度矢量 ,分布呈螺旋状 ,流动方向为由叶轮出口压力较高处沿螺旋线方向流至进口压力较低处 ,随着半径的减小速度逐渐降低。图 6 为本文研究对象 LCF100/350 型化工渣浆泵运行 6 个月后的泵体磨损情况 ,与图 5 对比可知 ,泵体表面磨损痕迹呈现螺旋状 ,沿叶轮旋转方向从叶轮出口至泵进口口环处 ,与图 5 所示的速度矢量方向完全一致。图 7 为叶轮中间截面与轴向间隙中间截面上的颗粒质量浓度分布对比 ,可以看出从叶轮进口之后 ,叶轮内介质在叶片的旋转作用下 ,逐步聚集在叶片工作面附近 ,而间隙内介质受叶片作用较弱 ,颗粒浓度随着半径的增大而增大。

形出现在吸力面后方 ,角涡呈圆形出现在压力面附近。

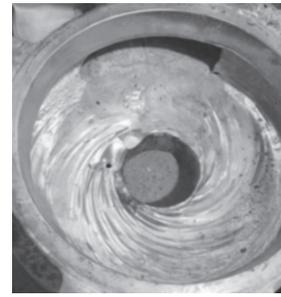


图 6 模型泵前泵腔磨损图

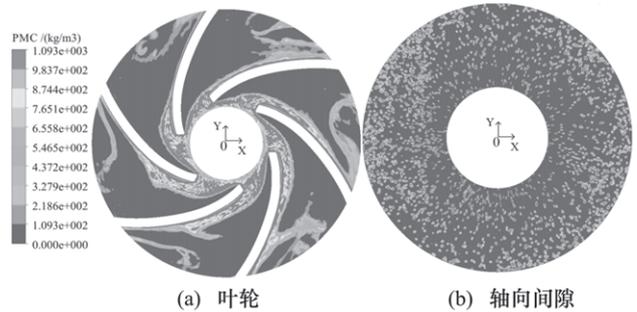


图 7 叶轮与轴向间隙中间截面颗粒质量浓度分布

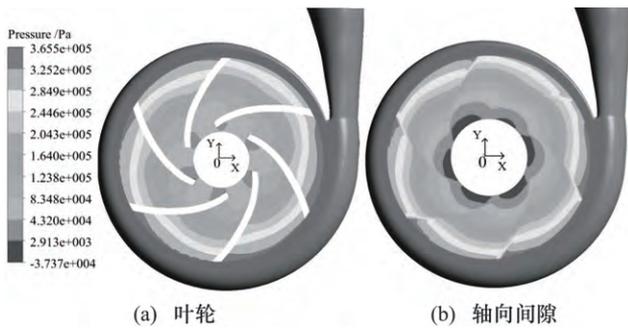


图 4 叶轮与轴向间隙中间截面压力分布图

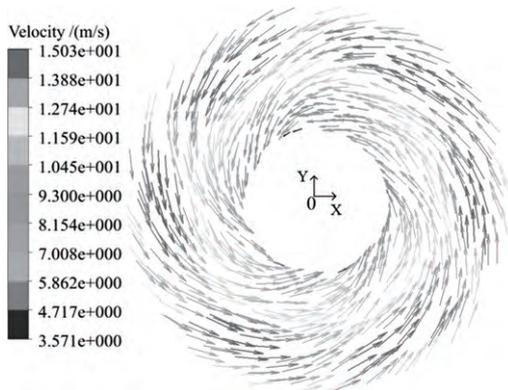
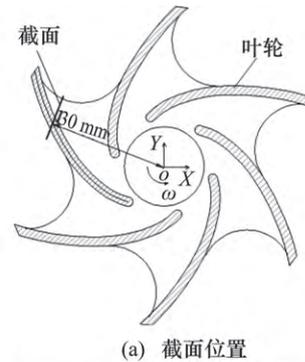


图 5 轴向间隙中间截面速度矢量分布图

为分析间隙泄漏流与主流间的相互干扰作用 ,截取某一叶片轴向间隙流场(如图 8 所示) ,由图可见叶片压力面和吸力面的压差产生了泄漏流 ,泄漏流方向与叶片旋转方向  $\omega$  相反。泄漏流与主流相互耦合产生泄漏涡和角涡 ,如图 8 ( I ) 、( II ) 所示 ,泄漏涡呈椭圆



(a) 截面位置

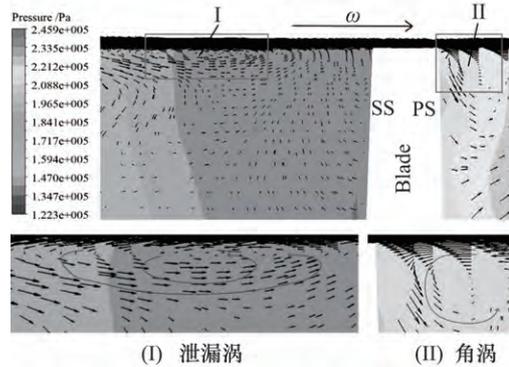


图 8 压力分布叠加速度矢量

2 泵体动态磨损特性分析

2.1 渣浆泵动态磨损模型

在离散相模型数值计算中 ,以磨损率来表示过流部件的磨损强度 ,磨损率计算公式如下:

$$R = \sum_{p=1}^{N_p} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A} \quad (1)$$

式中  $R$  —— 磨损率  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  
 $m_p$  —— 颗粒的质量流量  $\text{kg}/\text{s}$ ;  
 $C(d_p)$  —— 颗粒粒径函数;  
 $\alpha$  —— 颗粒对壁面的冲击角;  
 $f(\alpha)$  —— 冲击角的函数;  
 $b(v)$  —— 相对速度函数;  
 $A$  —— 过流部件磨蚀面积  $\text{m}^2$ 。

将磨损深度与磨损率建立关联, 构建壁面磨损深度预测模型, 单位时间内磨损深度  $\Delta h$ :

$$\Delta h = k \frac{R \cdot \Delta t}{\rho} \quad (2)$$

式中  $k$  —— 时间系数;  
 $\rho$  —— 材料密度。

考虑到工程中实际的磨损寿命可能是几个月甚至是几年, 难以模拟实际的磨损时间, 因此引入时间系数, 近似按照线性比例关系缩短模拟时间。壁面的实时磨损深度由单位时间内磨损深度积分可得, 沿时间积分即可得到泵体表面磨损深度随时间的变化曲线。

$$h_i^{n+1} = h_i^{n+1} + k \frac{R \cdot \Delta t}{\rho} \quad (3)$$

采用动网格方法实时更新计算域网格, 建立了 CFD 流场分析与边界磨损量动态耦合算法, 计算流程如图 9 所示。

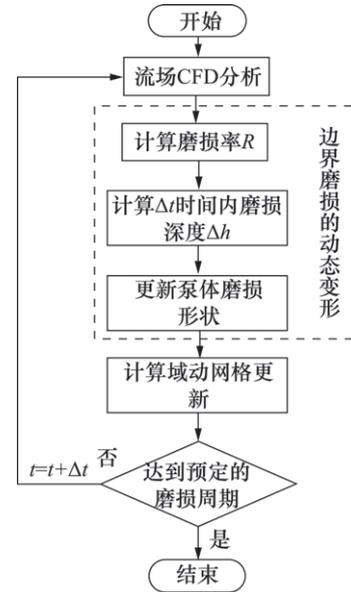


图 9 渣浆泵动态磨损模型计算流程图

### 2.2 磨损特性分析

图 10 为时间系数  $k$  取  $1\text{E} + 10$  不同时刻泵体壁面磨损率密度 (PERD) 的变化图,  $\text{PERD} = R \cdot \Delta t$ , 由图可见泵体的磨损主要集中在距离隔舌较远一侧, 磨损呈螺旋状由泵体进口边向外延伸, 由式 (1) 可知, 这与间隙内速度分布及固相浓度分布密切相关。图 11 为同一时间系数下泵体壁面磨损深度随时间变化图, 其变化规律与磨损率密度基本一致。

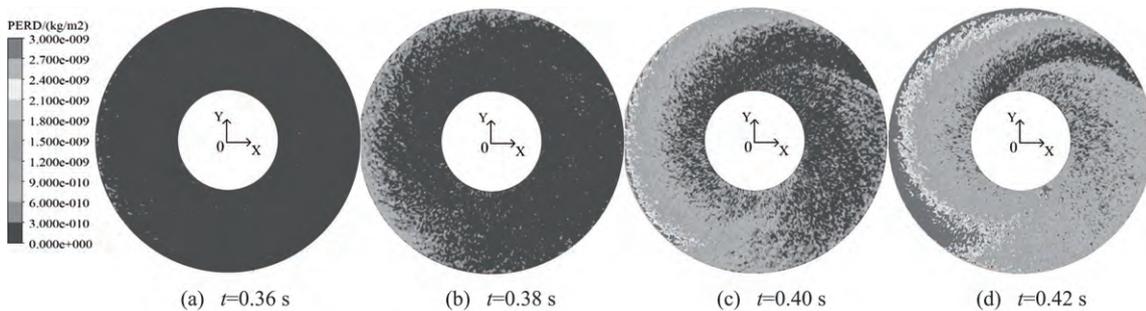


图 10 磨损率密度变化图

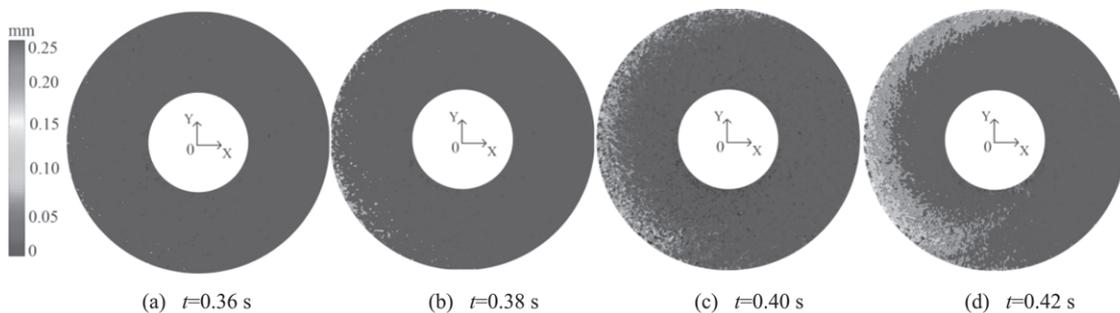


图 11 磨损深度变化图

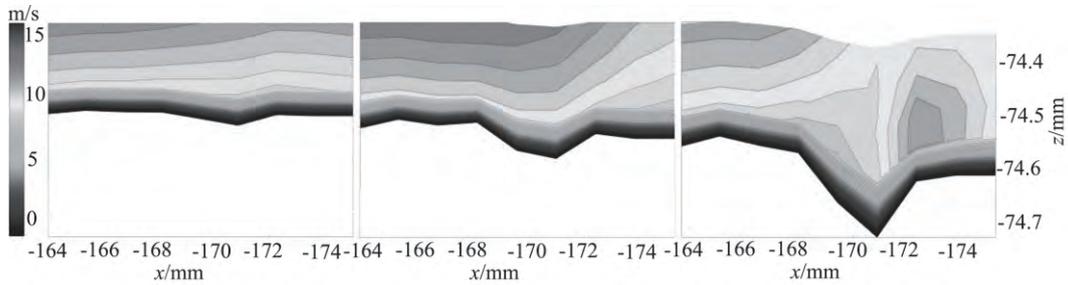
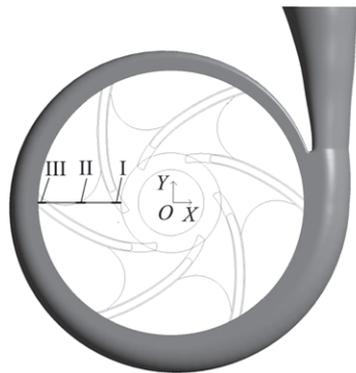
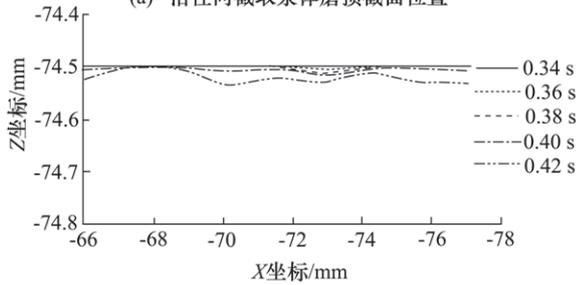


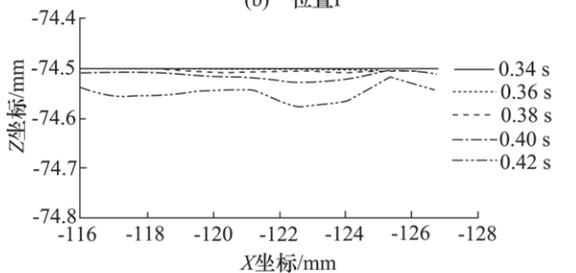
图 13 位置 III 速度云图随时间变化



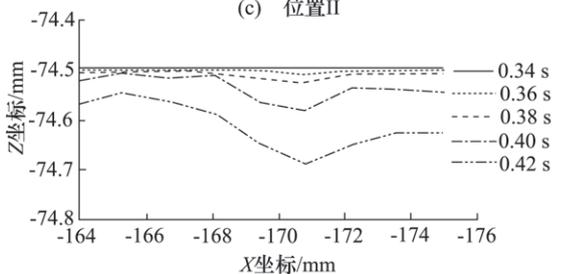
(a) 沿径向截取泵体磨损截面位置



(b) 位置 I



(c) 位置 II



(d) 位置 III

图 12 泵体壁面磨损动态变化图

图 12 为沿径向方向三个不同截面位置不同时刻泵体壁面磨损动态变化图,截面位置如图 12a 所示。由图可知随时间推移,壁面磨损的深度逐渐增大。对

比( I )、( II )、( III )位置处动态磨损情况可知,从叶轮进口边到出口边网格变化同样逐渐增大,与图 11 所示结果变化规律一致。

图 13 为截面 III 处,不同时刻间隙区域流动速度变化云图,由图可见在泵体壁面由于粘性边界层的存在,壁面速度为零,在叶轮的旋转作用下,沿壁面法向存在较大的速度梯度。随着时间的增加,泵体磨损的深度逐渐增大,其边界内部区域的流场也随之发生变化,流场的变化反过来又影响磨损强度的变化,相互耦合,表现为磨损深度随时间增长的强非线性关系。

在 CFD 流动分析中,壁面粗糙度对流场的影响难以通过实际流道表面的几何微结构来实现,其一般是通过壁面函数的修正项来实现<sup>[16-18]</sup>,通过修正项得到对数速度线的偏移量,从而实现对流场的影响。壁面粗糙度对磨损特性的影响也是通过其壁面函数的修正来影响壁面区域的流场分布,从而影响壁面磨损特性。为分析泵体表面粗糙度对其磨损特性的影响,分别对粗糙度为 0 mm、0.2 mm、0.4 mm 时的磨损特性进行分析,得到不同粗糙度下泵体壁面最大磨损深度随时间的变化曲线(如图 14),由图可知泵体最大磨损深度曲线随着壁面粗糙度增大而逐渐向上平移。

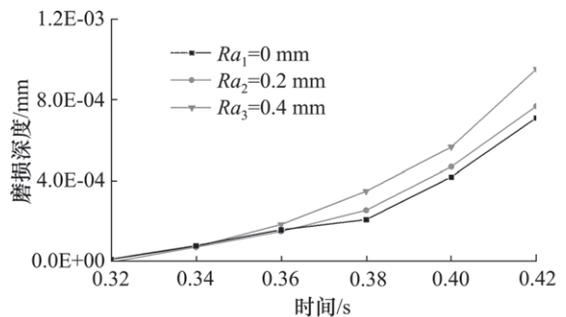


图 14 不同表面粗糙度时的最大磨损深度变化图

### 2.3 磨损的预测模型

为进一步分析磨损深度与时间之间的非线性关系,对研究磨损模型(式(2))中的时间系数分别取不同值进行磨损特性动态耦合分析。 $k$  分别取  $k_1 = 1$ 。

56E+07  $k_2 = 2k_1$   $k_3 = 3k_1$ 。图 15、图 16 为取不同时间系数  $k$  时泵体壁面最大磨损深度和最大磨损率密度变化图。由图可知 随时间变化,最大磨损深度呈非线性增长,且系数呈倍数增加,最大磨损深度与系数之间呈现非线性关系。随时间增加,磨损率密度增大,但系数改变时,最大磨损率密度基本保持不变。

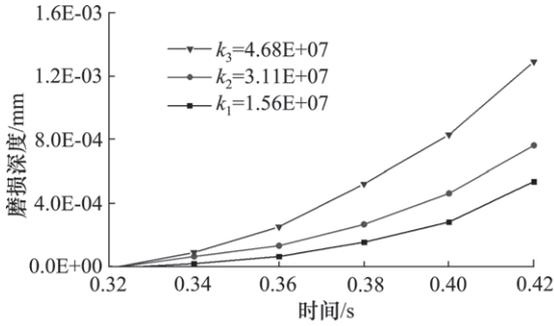


图 15 不同时间系数时的最大磨损深度变化图

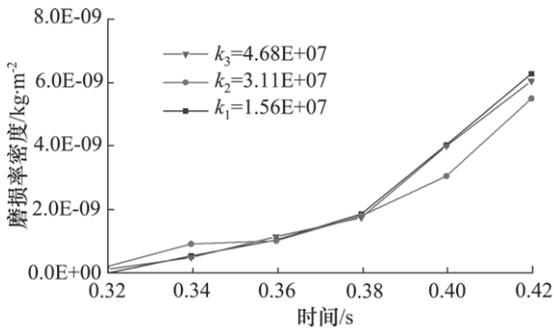


图 16 不同时间系数时的最大磨损率密度变化图

由实际磨损周期内的磨损量,对不同的时间系数及其模拟给定的时间周期所需要的计算时间的关系进行分析,将不同时间系数下的磨损深度进行高阶多项式曲线拟合(如图 17 所示)。

由于该模型泵体在实际的运行过程中 6 个月的运行周期内最大磨损量为 10 mm。系数取  $k_1$  时,按照线性模型模拟 6 个月的运行周期所需要的模拟时间为 1.0 秒,该时间下模拟的最大磨损深度为 3.962 mm。而当系数取  $k_2$  时,模拟该时间周期需要的模拟时间为 0.5 秒,该时间下模拟的最大磨损深度为 0.002668 mm;系数取  $k_3$  时,模拟该时间周期需要的模拟时间为 0.33 秒,该时间下模拟的最大磨损深度为 0.000194 mm。由图可知预测磨损深度与实际磨损深度相比误差非常大,这是由于计算时间转化为实际磨损时间过程中,将计算时间乘以不同的时间系数  $k$  此方法默认磨损深度随时间呈线性变化,而由图 15 分析可得,随时间增加,磨损深度呈非线性变化,在预测磨损深度时产生误差,因此需要对不同时间系数下的计算磨损深度进一步

修正。

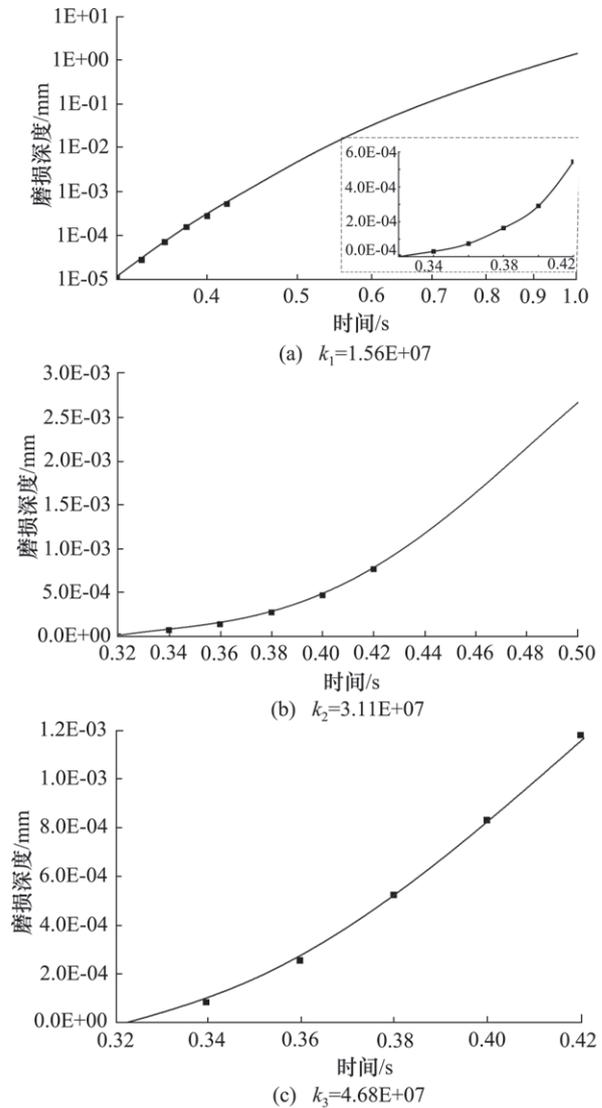


图 17 磨损深度预测曲线

根据磨损深度预测曲线,不同的时间系数下,相应与实际磨损周期 6 个月所对应的的模拟时间下磨损深度,与实际磨损周期内的磨损深度 10 mm 的比值为磨损深度修正系数  $\gamma$ ,且有  $\gamma = 10/\Delta h$ ,因此可得到不同时间系数下磨损深度的修正系数如表 1 所示。

表 1 不同预测曲线的修正系数  $\gamma$

| 系数                              | $k_1$ | $k_2$    | $k_3$     |
|---------------------------------|-------|----------|-----------|
| 计算时间 $t$ (s)                    | 1     | 0.5      | 0.33      |
| 计算深度 $\Delta h$ (mm)            | 3.962 | 0.002668 | 0.000194  |
| 修正系数 $\gamma$ (10/ $\Delta h$ ) | 2.53  | 1724.14  | 515729.76 |

对不同时间系数下的磨损深度修正系数进行拟合(如图 18 所示,纵坐标为对数坐标)。

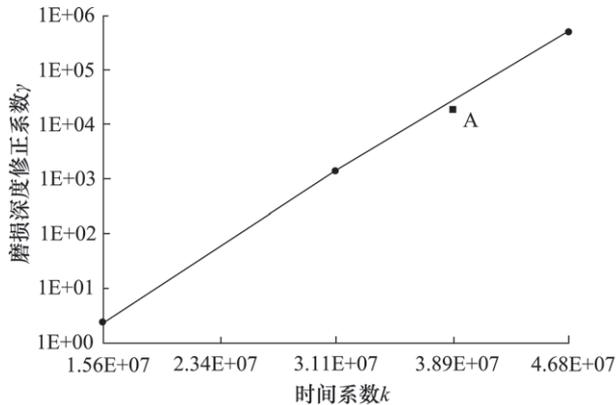


图 18 时间系数的非线性修正系数曲线

为了验证非线性修正系数模型的可靠性,由系数  $k_A (2.5 k_1)$  下预测的磨损深度进行验证,此时给定的磨损周期(6个月)所需要的模拟到的时间为  $0.4 \text{ s}$ ,其对应的最大磨损深度为  $0.0005205 \text{ mm}$ ,此时理论修正系数应为  $\gamma_A = 19212.30$ (如图 18 中 A 点),而由非线性预测模型可得其修正系数  $\gamma'_A = 20403.46$ ,实际的修正系数与非线性预测模型的修正系数值间的误差约  $6.2\%$ 。由预测模型得到的最大磨损深度  $h = 0.0005205 \times \gamma'_A = 10.62 \text{ mm}$ ,预测的最大磨损深度误差也为  $6.2\%$ 。该模型可以用于对不同时间系数下磨损深度的修正系数进行预测,对实际的磨损寿命进行近似预测,建立了基于时间系数法的磨损预测模型,该模型对渣浆泵磨损寿命预测提供了一种非常有效的方法。

### 3 结论

(1) 在叶片压力面和吸力面之间的压差作用下,叶片轴向间隙产生泄漏流,泄漏流与主流相互干扰,在吸力面后方形成泄漏涡,在叶片压力面靠近间隙附近产生呈圆形角涡;

(2) 由 CFD 流场模拟与边界磨损预测实时耦合分析,建立了泵体动态磨损模型,泵体壁面的磨损模拟结果表明,磨损强度随着半径的增大逐渐增大,呈螺旋状由进口边向外延伸。对比三种不同粗糙度下泵体壁面的磨损特性,其最大磨损深度随着壁面粗糙度增大而增大;最大磨损深度随时间增加且呈现很强的非线性,磨损率密度随时间增大而增大;

(3) 由实际运行周期内的磨损实测量对不同时间系数的预测模型进行修正,建立了基于时间系数法的磨损预测模型,算例计算结果验证了预测模型的可靠性,该研究为渣浆泵泵体磨损寿命的预测提供了一种非常有效的方案。

### 参考文献

- [1] 吴大转 杨帅,等. 开式叶轮离心泵性能的 CFD 模拟方法[J]. 机械工程学报, 2014, 27(2): 376-384.
- [2] 吴大转 孙幼波,等. 多级离心泵半开式叶轮参数优化的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 75-78.
- [3] 张剑慈 朱祖超,等. 开式叶轮高速离心泵叶形对泵内流场的影响分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 41-44.
- [4] Zhang D. S., Shi W. D.. Numerical and Experimental Investigation of Tip Leakage Vortex Trajectory and Dynamics in an Axial Flow Pump[J]. Computers & Fluids, 2015, 112(1): 61-71.
- [5] Liu Y. B., Tan L.. Spatial-temporal Evolution of Tip Leakage Vortex in a Mixed Flow Pump with Tip Clearance[J]. ASME J. Fluids Eng, 2019, 141(8): 081302.
- [6] Liu Y. B., Tan L.. Tip Clearance on Pressure Fluctuation Intensity and Vortex Characteristic of a Mixed Flow Pump as Turbine at Pump Mode[J]. Renewable Energy, 2018, 129: 606-615.
- [7] 吴波 严宏志 段益群,等. 渣浆泵三维湍流数值模拟及磨损特性研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 719-722.
- [8] Khalid Y. A., Sapuan S. M.. Wear Analysis of Centrifugal Slurry Pump Impellers[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2007, 59(1): 18-28.
- [9] 崔巧玲 李映 金守泉,等. 非定常固液两相对双流道泵磨损性能的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(4): 543-548.
- [10] 钱忠东 张凯 王志远,等. 双吸式离心泵叶片头部形状对泥沙磨损的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2): 103-107.
- [11] 刘建瑞 徐永刚 王董梅,等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 86-90.
- [12] 汪家琼 蒋万明 孔繁余. 基于 Particle 模型固液两相流离心泵流场数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(10): 846-850.
- [13] 陶艺 袁寿其,等. 渣浆泵叶轮磨损的数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 63-69.
- [14] 朱祖超 崔宝玲 李映,等. 双流道泵输送固液介质的水力性能及磨损试验研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 65-69.
- [15] 刘娟 唐澍. 离心泵内固体颗粒运动规律的实验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 168-172.
- [16] 蔡柳溪 高松,等. 壁面粗糙度对轴流压气机气动性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 36-42.
- [17] 刘通 蔡晋生,等. 壁面粗糙度湍流扩散模型及流动数值模拟[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1981-1989.
- [18] 尚东然 刘艳明,等. 粗糙度对多级压气机性能影响的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2019, 40(12): 2723-2730.