

文章编号: 1673-5196(2015)02-0055-06

基于颗粒摩擦和碰撞模型的离心泵叶片磨损预测

程效锐^{1,2}, 董富弟^{1,2}, 杨从新^{1,2}, 赵伟国^{1,2}, 张楠^{1,2}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用雷诺时均 N-S 方程、RNG $k-\epsilon$ 模型和 SIMPLE 算法, 以含沙水为介质, 基于代数滑移混合物模型 (algebraic slip mixture model, ASME) 对一台单级双吸式离心泵内固液两相流动进行全三维不可压缩定常流动数值模拟, 其中转子与定子之间耦合方式采用“冻结转子法”实现. 通过对比清水及含沙水介质时泵外特性试验数据与数值模拟结果, 验证了数值计算方法的可靠性. 基于颗粒摩擦和碰撞模型对固相体积分数分别为 5%、10%、15% 时叶片工作面 and 背面摩擦磨损强度和碰撞磨损强度进行预测, 结果表明: 在同一固相体积分数时, 从叶片进口至出口碰撞磨损强度逐渐增大, 且工作面大于背面, 摩擦磨损强度呈现先增大后减小, 又逐渐增大的趋势; 随着固相体积分数增大, 叶片表面碰撞磨损强度和摩擦磨损强度逐渐增大, 摩擦磨损强度沿着整个叶片均大于碰撞磨损强度.

关键词: 离心泵; 固液两相流; 磨损预测; 磨损模型; 数值模拟

中图分类号: TH31 文献标识码: A

Wear prediction of centrifugal pump blade based on particle friction and collision model

CHENG Xiao-rui^{1,2}, DONG Fu-di^{1,2}, YANG Cong-xin^{1,2},
ZHAO Wei-guo^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on algebraic slip mixture model, using SIMPLE algorithm, taking silt-laden water as medium, and RNG $k-\epsilon$ turbulence mode in Reynolds time-averaged Navier-Stokes equation, the full three-dimensional incompressible stationary solid-liquid two-phase flow in a double-suction centrifugal pump was numerically simulated. The “frozen rotor method” was used to realize the coupling mode of rotor with stator. By means of comparing the external characteristic test data of the pump with fresh or silt-laden water as medium to numeric simulation result, the reliability of the numeric computation method was verified. Based on particle friction and collision model, the wear intensity of friction and collision on blade pressure and suction surfaces was predicted in the case of different solid volume fractions (5%, 10%, and 15%). The results showed that when the solid volume fraction was identical the collision wear intensity of suction surface would gradually increase from blade inlet to outlet. And the collision wear of the pressure surface would be more serious than that of suction surface. The friction wear intensity would increase at first then decrease, and then again increase. With solid volume fraction increasing, the wear intensity of friction and collision of blade pressure and suction surfaces would increase and the friction wear would be more serious than collision wear.

Key words: centrifugal pump; solid-liquid two-phase flow; wear prediction; wear model; numerical simulation

收稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51269011), 甘肃省自然科学基金 (2011GS04252)

作者简介: 程效锐 (1972-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授.

双吸式离心泵由于叶轮的对称结构在工作时几乎不产生轴向力, 且便于维修, 被广泛应用于引黄灌区的提水灌溉中^[1]. 黄河中的悬移质泥沙造成泵过流部件材料磨损, 泵扬程和效率降低. 因此研究双吸

式离心泵在含沙水流下的流动规律及沙粒属性变化对材料磨损特性具有重要意义。

目前针对泵内固液两相流磨损特性分析主要有两种方法：一种是定性分析：即借助 CFD(computational fluid dynamics)中欧拉模型对泵内固液两相流动进行模拟，并根据数值模拟结果中相关参数的云图及矢量变化等对磨损特性做定性分析^[2-3]；另一种是定量分析：即运用试验方法和 CFD 中欧拉-拉格朗日模型来测算材料在含沙水流中的磨损量，或者在定性分析的基础上对磨损程度做量化的分析研究^[4-8]。目前，有关离心泵磨损的试验及数值模拟已经取得了一定成果，但鉴于泵内固液两相流动的复杂性和现有试验手段的制约，导致对离心泵叶轮在固液两相流作用下的磨损机理和定量磨损预测方面的研究还不够深入，各相关物理量对磨损程度的影响比重及变化规律方面的研究在国内外文献中几乎没有太多报道。本研究运用 CFD 数值模拟方法，结合颗粒摩擦和碰撞模型^[9]，对双吸式离心泵内的固液两相流动进行了全三维数值计算。对叶轮叶片摩擦磨损和碰撞磨损进行定量预测，并且对影响这两种磨损的相关参数在固液两相流动中的变化规律做进一步研究分析，得到了固相体积分数对双吸式离心泵叶片磨损特性的影响规律，为双吸式离心泵磨损机理和定量磨损预测方面的研究及优化设计提供依据。

1 数学模型的建立

1.1 基本假设

以含沙水流为研究介质，由于双吸式离心泵内部流动复杂，为了深入研究固液两相流内部流动及磨损机理，现做出以下假设：

- 1) 整个流道内介质为定常流动，转子和定子之间耦合方式采用“冻结转子法”实现；
- 2) 固相为直径均匀的球形颗粒，不考虑相变；
- 3) 固相颗粒为连续介质，液相为不可压缩流体，且每相的物理特性均为常数。

1.2 数值计算方法和边界条件

采用“冻结转子法”，建立相对坐标系下的雷诺时均连续方程和全三维不可压缩时均 N-S 方程，通过 RNG $k-\epsilon$ 模型简化和封闭方程组。两相流采用代数滑移混合物模型(algebraic slip mixture model, ASMM)^[4]描述。速度和压力之间耦合方式采用 SIMPLE 算法。对流项和扩散项的空间离散均采用一阶迎风格式，源项的空间离散采用线性化标准格式。各个控制方程收敛精度均为 10^{-5} 。假设壁面绝

热且满足无滑移条件，近壁面区域采用标准壁面函数处理，壁面材料取为 Ni-Cr 白口铸铁($\rho=7\ 600\text{ kg/m}^3$)。采用速度进口边界条件，假定进口处浓度分布均匀且等于固相输送浓度。出口采用自由出流条件。

1.3 磨损模型

图 1 为固相颗粒沿叶片运动的磨损示意图。将颗粒对叶片的磨损分为两种形式：一种是颗粒与叶片摩擦运动造成的摩擦磨损；另一种是颗粒与叶片碰撞运动造成的碰撞磨损^[9]。为便于分析比较，本研究将摩擦磨损率 W_{sl} 、碰撞磨损率 W_1 ($\mu\text{m/h}$) 分别定义为摩擦磨损强度和碰撞磨损强度。

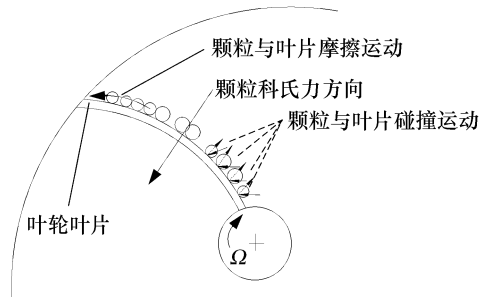


图 1 固相颗粒沿叶片的碰撞磨损和摩擦磨损

Fig. 1 Sand collision with and friction wear of blade

1) 摩擦磨损：

$$W_{sl} = \sum_{k=1}^N \frac{c_n \tau_k u_{tk}}{E_{Sp}(d)} \tag{1}$$

式中： $E_{Sp}(d) = 10^8 [A_{sl}(d+C_{sl})^{n_{sl}} + B_{sl}]$ 为单位摩擦磨损能， J/m^3 ； c_n 为固相浓度； τ_k 为壁面剪切应力， Pa ； u_{tk} 为固体颗粒的切向速度， m/s ； d 为粒径， μm ；其他参数是与材料相关的试验常数，对于 Ni-Cr 白口铸铁，取值如下^[9]： $A_{sl} = 4.236 \times 10^{14}$ ； $B_{sl} = 180$ ； $C_{sl} = 490$ ； $n_{sl} = -3.861$ 。

2) 碰撞磨损：

$$W_1 = \sum_{k=1}^N \frac{\rho_k c_n v_k^3}{E_{1k}(\alpha_k, d)} \tag{2}$$

式中： $E_{1k}(\alpha_k, d) = C_{adj} E_1(\alpha_k)$ ； $v_k = \sqrt{u_k^2 + v_k^2}$ ； $E_1(\alpha_k) = E_0 \left[\frac{4\alpha}{\pi} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) \right]$ ， $C_{adj} = A_{im}(1.65d + C_{im})^{n_{im}} + B_{im}$ ； u_k 和 v_k 分别为固体颗粒碰撞速度 v_k 在 x 和 y 方向上的速度分量(叶轮绕 z 轴旋转)；固体颗粒碰撞角 $\alpha_k = \tan^{-1}(|v_k|/|u_k|)$ ， rad ； ρ_k 为固体颗粒密度， kg/m^3 ； $E_1(\alpha_k)$ 为单位碰撞磨损能， J/m^3 ； E_0 为当 $\alpha = \pi/2$ 时磨损表面系数，与固相颗粒直径及壁面材料有关， J/m^3 ； C_{adj} 为自调整因子，其他参数是与材料相关的试验常数，对于 Ni-Cr 白口铸铁，取值如下^[9]： $E_0 = 2.77 \times 10^{15}$ ； $A_{im} = 8.578 \times 10^{10}$ ； $B_{im} = 3.645 \times 10^{-2}$ ； $C_{im} = 490$ ； $n_{im} = -3.668$ 。

1.4 计算模型

研究的双吸式离心泵设计工况下性能参数为:流量 $q_V=400 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=33 \text{ m}$,转速 $n=1\,480 \text{ r}/\text{min}$.模型泵压水室和吸水室分别采用螺旋形和半螺旋形结构,叶轮主要参数见表 1.

表 1 叶轮主要参数

Tab.1 Main parameters of impeller

参数	数值
叶轮出口直径 D_2/mm	355
轮毂直径 D_h/mm	40
叶轮进口直径 D_1/mm	80
叶片进口安放角 $\beta_2/(\text{°})$	23
叶片出口安放角 $\beta_1/(\text{°})$	38
叶片出口宽度 B_2/mm	22.5
叶片数	6
叶片包角 $\varphi/(\text{°})$	164

1.5 网格划分

吸水室、压水室和叶轮三部分计算区域均采用非结构化网格及不同网格尺度进行离散,叶片表面进行局部加密处理.通过对比分析数值模拟结果,进行了网格无关性检查.最终确定计算域网格总数为 15 875 640,吸水室、蜗壳及叶轮区域的网格数分别为 6 147 840、6 709 830、3 017 970.各区域网格划分结果如图 2 所示.

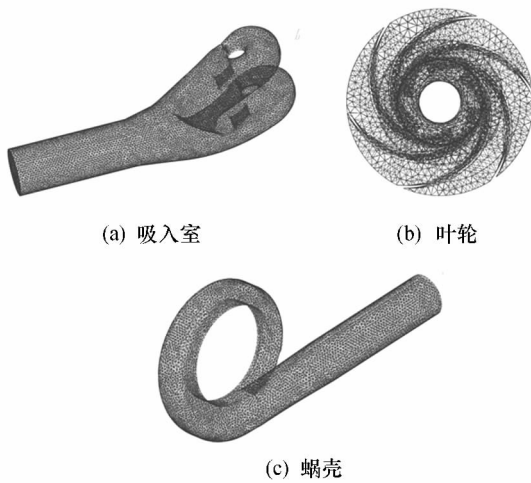


图 2 各计算区域网格划分

Fig.2 Grid division of computing areas

2 结果与分析

2.1 数值计算可靠性验证

为验证数值模拟结果的可靠性,采用开式实验台对双吸式离心泵进行外特性试验.经多年实测分组粒径资料统计,黄河上游流域多年平均粒径为 0.036 mm ^[10].图 3 为清水及含沙水(固相颗粒属性: $C_v=10\%$, $d=0.036 \text{ mm}$, $\rho_k=2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$)介质下泵的扬程和效率在八个工况点处($0.4q_V \sim 1.4$

q_V)的数值模拟值和试验值的比较.

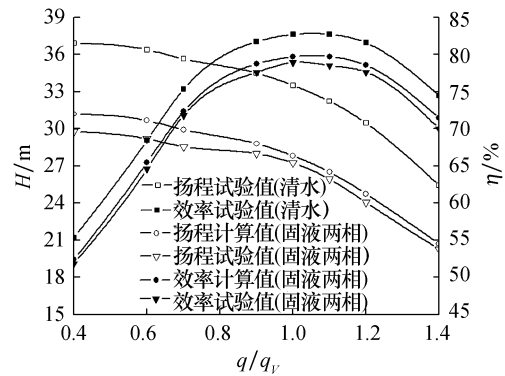


图 3 数值模拟与试验外特性曲线

Fig.3 External characteristic curve obtained with numerical simulation and experimental

数据显示模型泵扬程曲线没有出现“驼峰”现象,效率具有较宽的“高效区”.含沙水介质时泵扬程和效率的试验及计算值明显小于清水介质时外特性试验数据,可见固相介质的存在造成了严重能量损失,影响了泵的外特性.固液两相流介质时计算结果与试验值吻合较好,最大扬程误差不超过 2%,最大效率误差不超过 3.8%,在允许误差范围内,证明了代数滑移混合物模型在描述固液两相流流动时具有良好的适用性.

2.2 固相浓度对叶片磨损特性的影响

在设计流量及颗粒直径 $d=0.036 \text{ mm}$,密度 $\rho_k=2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的情况下,分别对固相体积分数为 5%、10%、15%时叶片磨损特性进行计算.为便于分析比较,将叶片平均中心流线从进口至出口距离定义为相对长度 $L=1$.

2.2.1 固相浓度对摩擦磨损特性的影响

图 4 为不同浓度固相颗粒切向速度沿叶片变化规律,从中可以看出,固相颗粒切向速度不随固相体积分数的变化而改变.相同固相浓度下工作面和背面固相颗粒切向速度最小值均为 $3.2 \text{ m}/\text{s}$,沿叶片基

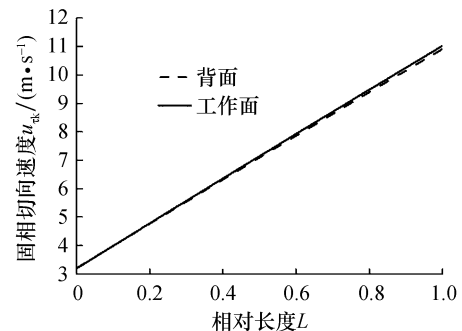


图 4 不同浓度固相颗粒切向速度沿叶片的变化规律

Fig.4 Variation pattern of tangential velocity of solid-phase particles with different concentrations

本呈线性增大的趋势,且在相同位置处工作面和背面速度值基本相等,最大值分别为 10.9 m/s 和 11.0 m/s.

图 5 为不同体积浓度固相颗粒沿叶片剪切应力变化规律.可以看出固相体积分数为 5% 时,工作面和背面剪切应力变化所呈现的规律是:在叶片中部,即从叶片进口至 0.3L 位置附近及 0.7L 至叶片出口,工作面剪切应力大于背面;叶片前部和后部位置,工作面剪切应力均小于背面;随着固相浓度的增大,三个区域的分界点向叶片进口处靠近.不同固相浓度时,从叶片进口至出口,工作面和背面剪切应力都呈现先增大后减小,又逐渐增大的趋势.固相体积分数较低时,背面剪切应力变化幅度较小,随着固相浓度增大,叶片相应位置剪切应力逐渐增大.工作面剪切应力最小值从 10.7 Pa 增大到 17.3 Pa,最大值从 71.5 增大到 77.9 Pa,背面剪切应力最小值从 20.0 Pa 增大到 24.6 Pa,最大值从 64.2 Pa 增大到 70.4 Pa.

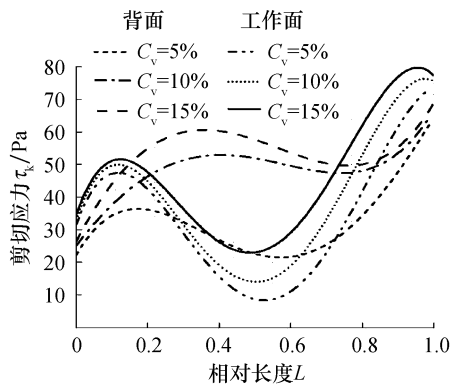


图 5 不同浓度固相颗粒剪切应力沿叶片的变化规律
Fig. 5 Variation of shear stress of solid-phase particle with different concentrations

图 6 为不同入口固相体积分数时颗粒浓度沿叶片的分布规律.叶轮入口固相体积分数为 5% 时,固相浓度在工作面和背面分布基本相等,沿着整个叶片长度变化较小.随着固相体积分数增大,背面和工作面相应位置固相浓度逐渐增大,在固相体积分数为 10% 和 15% 时,固相颗粒在背面上的浓度分布沿着叶片进口至出口呈现先减小后增大趋势,在 0.3L 附近达到最小值.工作面浓度分布沿着叶片进口至出口以 0.8L 位置处为转折点呈现先减小后增大的趋势.0.3L 之前工作面浓度分布大于背面,0.3L 之后则相反.这主要是由于固相颗粒在叶轮进口处由于叶片排挤和冲角原因,工作面附近固相体积分布大于背面,之后由于固相在流体中跟随性降低,其惯性力导致背面附近固相浓度大于工作面.0.8L

位置附近,即双吸流道介质开始混合处,工作面固相浓度有所增大.

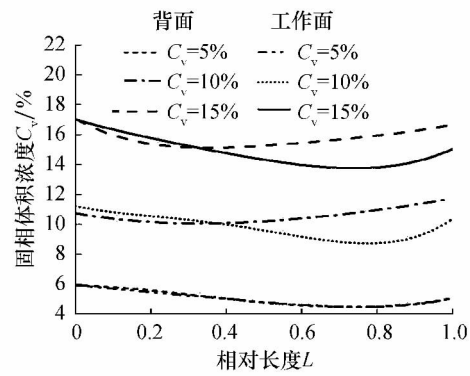
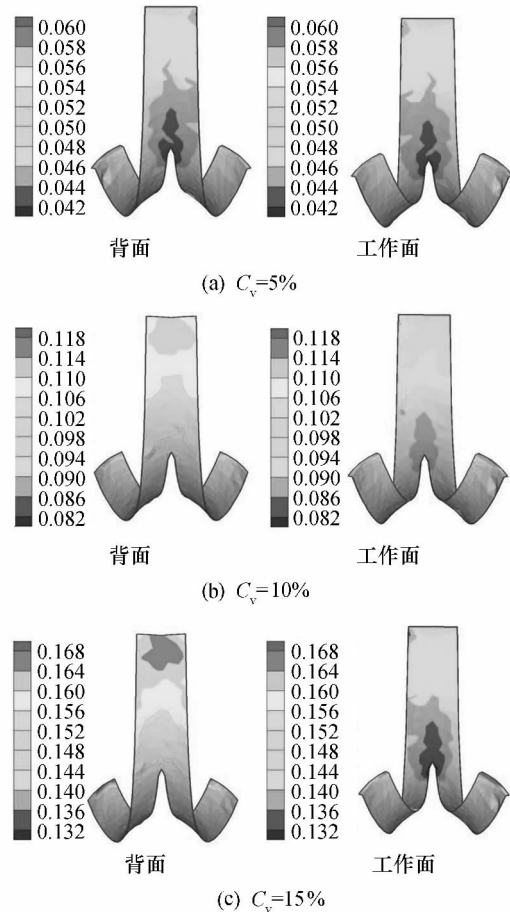


图 6 不同入口固相体积分数时颗粒浓度沿叶片的分布规律
Fig. 6 Distribution of particle concentration on blades when solid-phase volume fraction at inlet is different

图 7 为叶片的摩擦磨损强度随固相浓度的变化规律.在同一体积浓度时,叶片工作面和背面摩擦磨损强度从叶片进口至出口位置呈现先增大后减小,又逐渐增大的趋势,工作面上摩擦磨损强度的波动值大于背面的波动值.随着固相浓度的增大,分界位置分布向叶片入口和出口移动.在叶片入口和叶

片出口处,工作面摩擦磨损强度大于背面,其余位置背面摩擦磨损强度大于工作面.工作面摩擦磨损强度最大值是最小值的 6~9 倍,背面则为 6~12 倍.固相体积分数为 5% 时叶片工作面和背面的磨损强度最小且其最值相等,最小值和最大值分别为 $1.68 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{h}$ 和 $0.11 \mu\text{m}/\text{h}$.摩擦磨损强度沿叶片长度变化趋势与图 5 中剪切应力变化趋势基本一致,数据大小主要由固相颗粒切向速度、剪切应力和固相浓度共同决定.

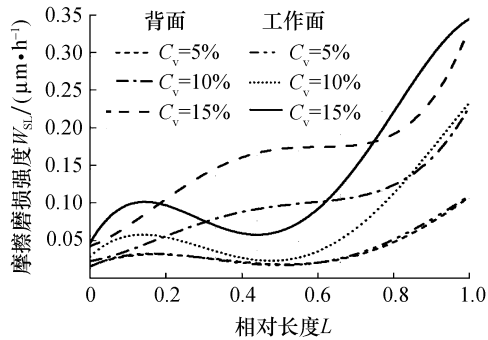


图 7 叶片摩擦磨损强度随固相体积分数的变化规律
Fig. 7 Variation of friction wear intensity with solid-phase volume fraction

2.2.2 固相浓度对碰撞磨损特性的影响

图 8 为不同固相体积分数的固相颗粒碰撞速度沿叶片的变化规律.从图可以看出,同一浓度下固相颗粒碰撞速度在背面和工作面进口 0.1L 附近最小,沿叶片逐渐增大.工作面固相颗粒碰撞速度大于背面,在 0.5L 附近工作面和背面固相碰撞速度基本相等.固相体积分数为 5% 时工作面固相颗粒碰撞速度的最小值和最大值分别为 4 m/s 和 11.7 m/s,背面分别为 3.6 m/s 和 11 m/s,随着固相体积分数的增大,叶片相应位置固相碰撞速度逐渐增大,工作面和背面固相碰撞速度在 0.5L 至出口相差不大.

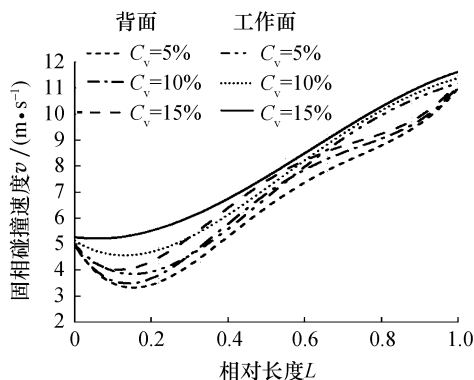


图 8 不同浓度固相颗粒碰撞速度沿叶片的变化规律
Fig. 8 Variation of collision velocity of solid-phase particle with different concentrations on blade

图 9 为不同浓度固相颗粒碰撞角沿叶片的变化规律.固定浓度下,以 0.5L 附近位置为折点,0.5L 之前由于进口位置流动比较紊乱,固相颗粒碰撞角波动十分明显;0.5L 之后碰撞角变化沿叶片至出口逐渐增大.从叶片进口至 0.4L 位置处,背面碰撞角大于工作面;0.4L~0.6L 处,工作面碰撞角大于背面;0.6L 至叶片出口,背面碰撞角又大于工作面.固相体积分数为 5% 时叶片工作面和背面固相碰撞角基本相等,叶片工作面上碰撞角从最小值 0.24 rad 增大到 2.3 rad,背面则从 0.29 rad 增大到 2.36 rad.随着固相体积分数的增大,叶片相应位置的固相碰撞角逐渐增大.

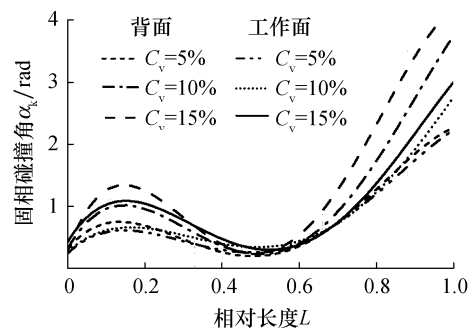


图 9 不同浓度固相颗粒碰撞角沿叶片的变化规律
Fig. 9 Variation of collision angle of solid-phase particle with different concentrations on blade

图 10 为叶片的碰撞磨损强度随浓度的变化规律.从图可以看出,在固定浓度下叶片碰撞磨损强度沿着叶片从进口至出口逐渐增大.由式(2)可知,碰撞磨损强度沿叶片的变化规律由固相颗粒碰撞速度、碰撞角和浓度变化规律共同决定.虽然图 6 中 0.3L 之前工作面固相浓度分布大于背面,0.3L 之后则相反.但是图 8 中工作面固相颗粒碰撞速度沿整个叶片大于背面,而碰撞磨损强度与碰撞速度的 3 次方成正比.再结合固相碰撞角的变化规律,使得碰撞磨损强度分界点在图 6 叶片固相浓度分布以 0.3L 为分界点的基础上后移至 0.4L 附近位置,0.4L 之前由于固相惯性力较小,磨损强度增大趋势不明显,工作面和背面处碰撞磨损强度基本一致;0.4L 之后逐渐增大,且工作面的磨损强度大于背面,同时沿着叶片至出口位置,强度差值逐渐增大.固相体积分数为 5% 时叶片工作面和背面处磨损强度最小,且工作面和背面处碰撞磨损强度基本一致.随着固相体积分数的增大,叶片碰撞磨损强度逐渐增大.工作面上碰撞磨损强度的最大值从 $2.83 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{h}$ 增大到 $6.42 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{h}$,最大值是最小值的 57~80 倍.背面上的碰撞磨损强度最大值从

$2.82 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{h}$ 增大到 $5.79 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{h}$, 最大值是最小值的 53~71 倍。

同图 7 相比, 整个叶片上摩擦磨损强度远大于碰撞磨损强度. 这主要是由于固相体积分数增大时, 流体中固相颗粒数增多, 单位时间在单位面积上与叶片发生碰撞和摩擦的固相颗粒数增多, 导致碰撞磨损强度和摩擦磨损强度沿着叶片进口至出口逐渐增大. 在叶片入口及中部由于流道的约束较强, 固相颗粒基本沿着叶片运动, 从而摩擦磨损强度远大于碰撞磨损强度. 而叶片后部由于双吸流动的汇合以及轴向漩涡的存在, 使得碰撞磨损强度增大, 与摩擦磨损强度的比值大幅降低.

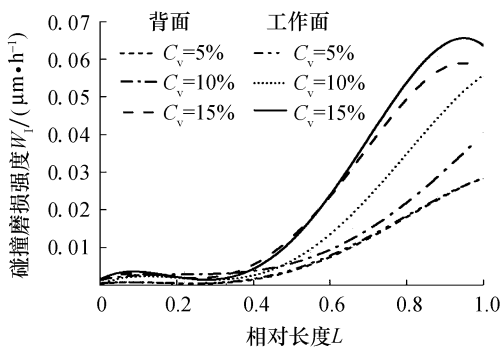


图 10 叶片碰撞磨损强度随固相体积分数的变化规律

Fig. 10 Variation of blade collision wear intensity with solid-phase volume fraction

3 结论

1) 入口固相体积分数变化对叶片碰撞磨损强度和摩擦磨损强度有很大的影响. 随着固相体积分数的增大, 工作面和背面碰撞磨损强度及摩擦磨损强度均逐渐增大. 随着固相体积分数的增大, 在叶片入口及中部摩擦磨损强度远大于碰撞磨损强度, 叶片后部二者比值大幅降低. 所以固液两相流离心泵叶片水力设计中针对不同浓度的叶片形状应不同.

2) 在相同固相体积分数下, 沿叶片进口至出口碰撞磨损强度逐渐增大, 且工作面大于背面; 摩擦磨损强度呈现先增大后减小, 又逐渐增大的趋势, 工作面波动幅值较大.

3) 随着固相体积分数的增大, 工作面摩擦磨损强度最大值是最小值的 6~9 倍, 而背面为 6~12 倍; 工作面碰撞磨损强度的最大值是最小值的 57~

80 倍, 而背面为 53~71 倍.

4) 在工况和固相颗粒属性变化时, 本研究中双吸离心泵叶片的磨损均表明主要是由摩擦磨损造成的, 所以在固液两相流泵叶片的设计中应重点考虑减小叶片摩擦磨损.

5) 固相颗粒体积分数对双吸离心泵叶片磨损程度的影响要大于固相颗粒直径的影响, 且磨损的位置也有所不同^[11].

参考文献:

[1] 钱忠东, 王 焱, 郜元勇. 双吸式离心泵叶轮泥沙磨损数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 223-229.

[2] 程效锐, 李仁年, 郭伟丽, 等. 背叶片对固液两相螺旋离心泵轴向力与流场的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 29-34.

[3] LI W, SHI W D, JIANG X P, *et al.* The internal flows in the impeller of sewage pump with solid-liquid two-phase [J]. Procedia Engineering, 2012, 31: 170-175.

[4] 张玉良, 李 旻, 崔宝玲, 等. 两相流离心泵水力输送性能计算分析 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 169-176.

[5] PAGALTHIVARTHI K V, GUPTA P K, TYAGI V, *et al.* CFD prediction of erosion wear in centrifugal slurry pumps for dilute slurry flows [J]. Journal of Computational, Multiphase Flows, 2011, 10(3): 225-245.

[6] VESELIN B. Erosion wear model of slurry pump impeller [J]. Journal of Tribology, 2010, 132(4): 1-5.

[7] SUGIYAMA K, NAGASAKA H, ENOMOTO T, *et al.* Prediction of wear depth distribution by slurry on a pump impeller [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2009, 3(2): 21-30.

[8] SONG X G, PARK J H, KIM S G, *et al.* Performance comparison and wear prediction of jet pumps by using a numerical method [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013, 57: 245-253.

[9] PAGALTHIVARTHI K V, GUPTA P K. Prediction of erosion wears in multi-size particulate flow through a rotating channel [J]. FDMP-Fluid Dynamics & Materials Processing, 2009, 5(1): 93-121.

[10] 陈五一, 夏 军, 朱鉴远. 水水泥沙研究新进展——中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会第八届学术讨论会 [C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 363-368.

[11] 杨从新, 董富弟, 程效锐, 等. 含沙水流中粒径对离心泵叶轮磨损特性影响的数值分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(4): 45-50.