

基于 Partical 模型的固液两相流贯流式水轮机流场数值模拟

彭笙洋¹, 李正贵¹, 张家荣², 李新锐¹

(1. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039; 2. 重庆水轮机厂有限责任公司, 重庆 402283)

摘要: 为了研究灯泡贯流式水轮机在固液两相流动下过流部件的磨损程度, 以某水电站实际运行的水轮机为研究对象, 基于 Particle 模型和非均相模型, 对水轮机内部流场进行数值模拟。分析了体积分数为 1%, 泥沙粒径为 0.01、0.05、0.10 和 0.25 mm 时, 过流部件工作面和背面的固体颗粒相的滑移速度及固相体积分数。结果表明: 随着颗粒粒径的增大, 桨叶上固体颗粒相的滑移速度减小、导叶上滑移速度增大; 在桨叶进水边和轮缘, 导叶的进水边和轮毂处固体颗粒相的体积分数较大, 磨损较为严重, 与现场真机照片磨损位置相同, 说明采用 Particle 模型和非均相模型能准确地模拟固液两相流水轮机内的流动规律。

关键词: 贯流式水轮机; 固液两相流; 滑移速度; 体积分数

中图分类号: TK73 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.013

[引用本文格式] 彭笙洋, 李正贵, 张家荣, 等. 基于 Partical 模型的固液两相流贯流式水轮机流场数值模拟[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 94-102. PENG Sheng-yang, LI Zheng-gui, ZHANG Jia-rong, et al. Numerical simulation of flow field of solid-liquid two-phase tubular turbine based on partical model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 94-102.

Numerical Simulation of Flow Field of Solid-Liquid Two-Phase Tubular Turbine based on Partical Model

PENG Sheng-yang¹, LI Zheng-gui¹, ZHANG Jia-rong², LI Xin-rui¹

(1. Xihua University Key Laboratory of Fluid and Power Machinery Ministry of Education, Chengdu, China, Post Code: 610039; 2. Chongqing Water Turbine Factory Co., Ltd., Chongqing, China, Post Code: 402283)

Abstract: In order to study the degree of wear of the components of the bulb tubular turbine under the solid-liquid two-phase flow, the actual operation of the turbine of a hydropower station is studied. Based on the Particle model and the heterogeneous model, the internal flow field of the turbine is numerically simulated. The slip velocity and sediment volume fraction of the solid particle phase on the front and back of the component are analyzed when the incoming sediment volume fraction is 1% and the sediment particle size is 0.01 mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.25 mm. The results show that as the particle diameter increases, the slip velocity of the solid particle phase on the blade decreases and the slip velocity on the vane increases. At the inlet edge and the rim of the blade, the volume fraction of the solid particle phase at the inlet edge and the hub of the vane is larger, and the wear is more serious. This result agrees well with reality on the wear position, indicating that the particle model and the heterogeneous model can accurately simulate the flow field in the solid-liquid two-phase flow turbine.

Key words: bulb tubular turbine, solid-liquid two-phase, slip velocity, volume fraction

收稿日期: 2019-06-04; 修订日期: 2019-07-03

基金项目: 国家重点研发计划专项(2018YFB0905205-05); 西华大学(xjgg2017083); 西华大学研究生创新基金(ycyj2018039)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China(2018YFB0905205-05), Xihua University(xjgg2017083), Xihua University Graduate Innovation Fund(ycyj2018039).

作者简介: 彭笙洋(1995-), 男, 四川绵阳人, 西华大学硕士研究生, E-mail: a541792386@qq.com.

通讯作者: 李正贵(1974-), 男, 甘肃兰州人, 西华大学教授, E-mail: lzhuigui@mail.xhu.edu.cn.

引言

水轮机内流动较为复杂,伴随着湍流,有时空化与泥沙磨损同时发生,产生更为复杂的流动,造成更大的破坏。当今机组朝着大容量、高水头方向发展,泥沙磨损问题是其制约因素之一,因此国内外学者及工程界专家对此进行了深入研究。

近年来,在固液两相流领域,国内外学者们做了大量研究工作。Adnan Aslam Noon 等人^[1]基于 AN-SYS CFX 软件平台,使用 Finnie 腐蚀模型预测巴基斯坦喜马拉雅山脉的 Tarbela Dam Hydel 项目其中一台混流式水轮机的转轮、固定导叶及活动导叶的腐蚀位置,CFD 分析显示,与之前使用类似几何形状和操作条件进行的实验工作的结果非常吻合。廖姣等人^[2-4]先采用单一变量法,与清水相比,研究了不同来流泥沙直径对高水头混流式水轮机和离心泵的过流部件内压力及泥沙分布的影响,再通过控制变量法,研究了不同泥沙浓度以及直径对转轮叶片表面压力分布、磨损情况以及水轮机效率的影响。周世杰等人^[5]基于 N-S 方程和欧拉-拉格朗日方法,在不同泥沙浓度工况下对离心泵进行了流场压力、流速以及盖板磨损情况进行了分析。黄剑峰等人^[6]基于 Fluent 软件,采用欧拉-欧拉方法中的代数滑移固液两相流模型对混流式水轮机流道进行了泥沙磨损规律的研究。张自超等人^[7]研究了固液两相流数值计算中常用的 Wen-Yu 模型,对该模型进行湍流修正函数修正后,在不同的来流速度下得到了更加精确的结果。张广等人^[8]在不同泥沙浓度及粒径下,通过求解雷诺时均 N-S 方程和重正化群 $k-\varepsilon$ 湍流方程,分析了混流式水轮机转轮的应力场及叶片表面的泥沙分布规律。施卫东等人^[9]设计了不同后掠式叶轮结构,在不同后掠角度情况下分析轴流泵叶轮在污水固液两相流介质中的磨损规律及运行可靠性。张自超等人^[10]采用改进的固液两相流欧拉算法对双吸离心泵进行计算,计算结果比传统算法更符合离心泵实际磨损情况,考虑湍动尺度效应后得到的磨损率也有所增大。汪家琼等人^[11-12]基于 Particle 模型和非均相模型对离心泵内部流场做了固液两相流数值计算,在一定固相颗粒体积分数,不同颗粒直径条件下,探讨并分析了过流

部件壁面处固相颗粒的滑移速度与体积分数的分布规律,以及滑移速度和体积分数与过流部件磨损的关系。PENG G 等人^[13]基于欧拉-拉格朗日方法,对混流式水轮机进行了稳态固液两相流模拟,采用 Finnie 腐蚀模型预测转轮叶片与导叶的磨损率,并分析了磨损率与泥沙浓度的关系和正常运行条件下磨损率的分布位置,将模拟结果与现场试验对比发现,磨损率与泥沙浓度成正相关关系,转轮的磨损程度大于导叶。

当前,欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法是研究固液两相流的常用方法,本文采用 Particle 模型和非均相模型对固液两相贯流式水轮机内部流场进行数值模拟,研究其内部固液两相的流动特性,并重点分析固相在过流部件的滑移速度和体积分数,进而研究固液两相流的流动机理和对过流部件的磨损规律。

1 计算方法选取

1.1 基本假设

灯泡贯流式水轮机流场复杂,作具体假设:(1) 液相(水)为连续不可压缩流体,而固相(泥沙)为分散相,且液相与固相之间不考虑热交换;(2) 固相为均匀且等粒径的球形颗粒,忽略相变影响;(3) 忽略固体颗粒自身旋转、颗粒间相互碰撞及破裂等现象。

1.2 固液两相流控制方程

欧拉坐标系下固液两相流运动方程如下:

液相的连续方程:

$$\frac{\partial \varphi_L}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varphi_L U_i) = 0 \quad (1)$$

固相的连续方程:

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varphi_s V_i) = 0 \quad (2)$$

液相的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_L U_i) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\varphi_L U_i U_k) = -\frac{1}{\rho_L} \varphi_L \frac{\partial P}{\partial x_i} + v_L \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\varphi_L \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{B}{\rho_L} \varphi_L \varphi_s (U_i - V_i) + \varphi_L g_i \quad (3)$$

固相的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_s V_i) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\varphi_s V_i V_k) = -\frac{1}{\rho_s} \varphi_s \frac{\partial P}{\partial x_i} + v_s \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\varphi_s \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{B}{\rho_s} \varphi_L \varphi_s (V_i - U_i) + \varphi_s g_i \quad (4)$$

式中: V_i —固相速度分量, m/s ; U_i —液相速度分量, m/s ; ρ —相材料密度, kg/m^3 ; p —压强, Pa ; v —相材质运动粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; x_i —坐标分量; g —重力加速度, 9.8 m/s^2 ; $B = 18(1 + B_0)\rho_L v_L/d^2$, 各相间互相作用的系数; d —颗粒的直径, mm ; 考虑除 Stokes 线性阻力以外作用的其他因素, 引进了 B_0 项, B_0 一般来说不是常数, 而是与颗粒的雷诺数等流场的参数相关; φ —相体积分数, 且有关系方程: $\varphi_L + \varphi_S = 1$, 下标: L 和 S—液相及固相, i, j, k —张量的坐标。

1.3 计算模型及数值方法

贯流式水轮机来源于某水电站, 计算工况为活动导叶开度 34.544° , 浆叶开度 10° 。流体域计算模型如图 1 所示。

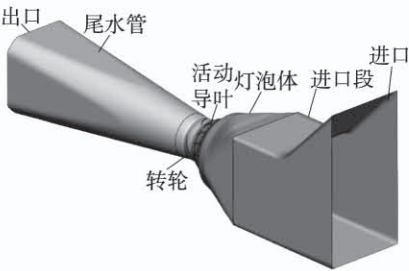


图 1 贯流式水轮机流体域计算模型

Fig.1 Computational model of tubular turbine fluid domain

为提高计算精确度, 进口段、灯泡体和尾水管流体域为结构化网格, 活动导叶与转轮流体域为非结构化网格, 经网格无关性验证, 如图 2 所示, 最终确定网格单元数为 8 877 746, 节点数为 1 937 620, 各部分网格数量如表 1 所示, 其流体域网格如图 3 所示。

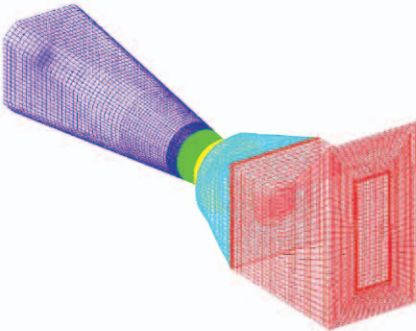


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

表 1 水轮机各部件网格分布情况

Tab.1 Grid layout of turbine components

名称	网格数量	网格节点	网格类型
进口段	65 588	69 260	六面体网格
灯泡体	30 240	34 188	六面体网格
活动导叶	5 528 362	1 071 163	四面体网格
转轮	3 091 201	594 621	四面体网格
尾水管	162 355	168 388	六面体网格

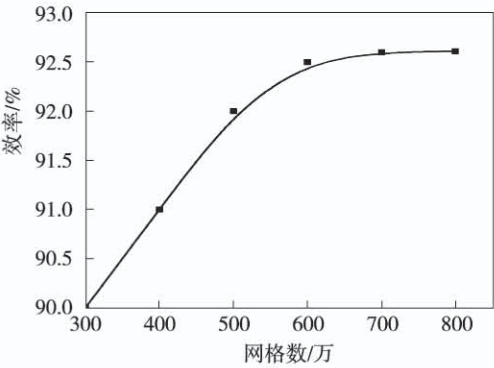


图 3 流体域网格

Fig.3 The grid of fluid field

在非定常计算中, 泥沙密度设为 $2\ 650 \text{ kg/m}^3$, 为均匀圆球颗粒, 多相流模型采用非均相多相流模型, 液相使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 固相使用离散相零方程模型^[14-15]。相间传输采用 Particle 模型, 动量交换考虑拽力, 并使用 Schiller Naumann 函数模型, 不考虑升力、虚拟质量力及壁面润滑力的影响。非定常计算以定常计算为初始值, 湍流耗散力采用法夫尔平均拖拽力 (Favre Averaged Drag Force), 系数取 0.9, 湍流输送模型使用佐藤增强粘度 (Sato Enhanced Viscosity)。进口选择质量流量条件, 出口为压力出口条件。连续相设为无滑移壁面边界, 固相设置为自由滑移壁面边界。壁面接触模型选取体积分数模型, 动静转子交界面采用冻结转子 (Frozen Rotor)。设定物理时间步长为 $1/\omega$, 即转轮旋转角速度的倒数。先进行了定常计算, 然后将此结果作为初始值, 再进行固液两相流非定常计算, 固液两相计算的收敛精度为 10^{-4} 。

2 计算结果及分析

由于在不同情况下, 水轮机运行中含沙水的固相浓度不同。在较低的固相浓度下, 便于研究颗粒

在两相流水轮机中的运动规律。固相体积分数为 10% 是选用两相流模型或离散相模型的分水岭。结合相关水域资料,选取颗粒浓度 1% 的工况来研究固液两相流贯流式水轮机的内部流动规律,平均粒径 d 分别取 0.01、0.05、0.10 和 0.25 mm。在清水 8 m 扬程工况下进行数值模拟,分析不同粒径固相对贯流式水轮机内部的固液两相流动规律的影响,研究过流部件固相的滑移速度和体积分数分布,

进而揭示固液两相水轮机的磨损情况。

2.1 浆叶表面固相的滑移速度分布

浆叶是贯流式水轮机做功的部件,固液两相流中的固相流动直接影响着浆叶的磨损以及做功情况。固液两相间的滑移速度是导致叶片表面固相体积浓度分布的变化的主要原因,因为 4 个浆叶速度分布相当,因此选取其中一个进行分析,图 4 为 4 种粒径下浆叶工作面和背面的滑移速度云图。

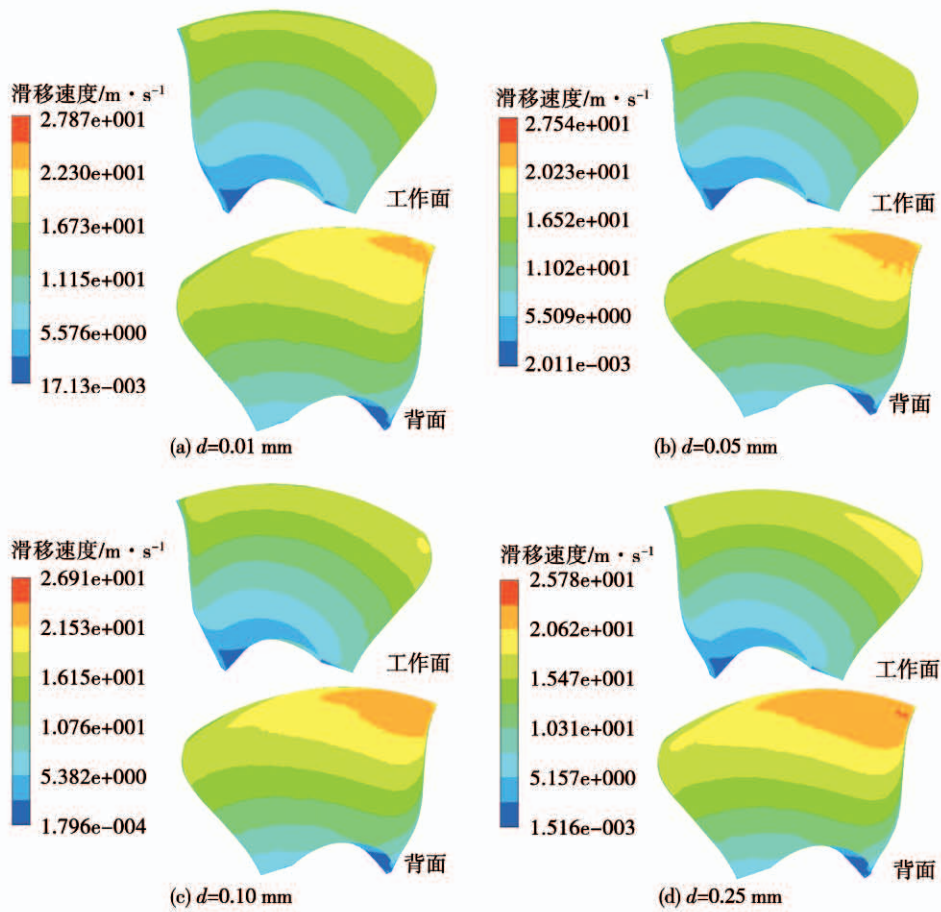


图 4 不同泥沙粒径下的浆叶的固相的滑移速度分布

Fig. 4 Slip velocity distribution of solid phase of blade under different sediment particle sizes

从图 4 中可知,浆叶工作面滑移速度整体比背面小,且沿着半径方向,滑移速度逐渐增大。另外随着粒径的不断增大,工作面和背面滑移速度逐渐减小。观察到在背面靠近轮缘处有一个最大的滑移速度区域,随粒径增大,该区域逐渐变大,表面该区域磨损严重。

图 5 是在浆叶工作面和背面标出的 24 个数据点取样点,从轮毂沿半径到轮缘编号 1 - 12。图 6 为不同粒径时,叶片工作面和背面的取样点处固相

滑移速度曲线图。由图 6 可知,工作面和背面的滑移速度沿着半径方向都是逐渐增大,在靠近轮缘处会有所减小。并且,在不同粒径工况下,滑移速度相差无几,且背面滑移速度仍然大于工作面。这是由于本研究计算的固相浓度不高,因此粒径不同对滑移速度影响不明显。

2.2 浆叶表面固相的体积分数分布

浆叶上的固相体积分数决定着颗粒相对壁面的磨损程度。水轮机运行的过程中含沙水主要作

用于转轮叶片的工作面,对工作面的磨蚀破坏较为严重。

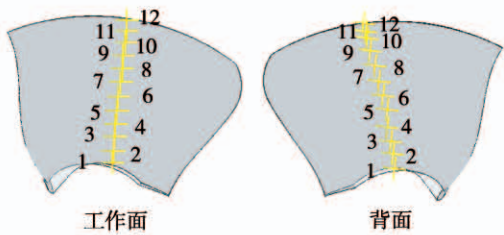


图 5 桨叶数据点位置
Fig.5 Probe location of blade

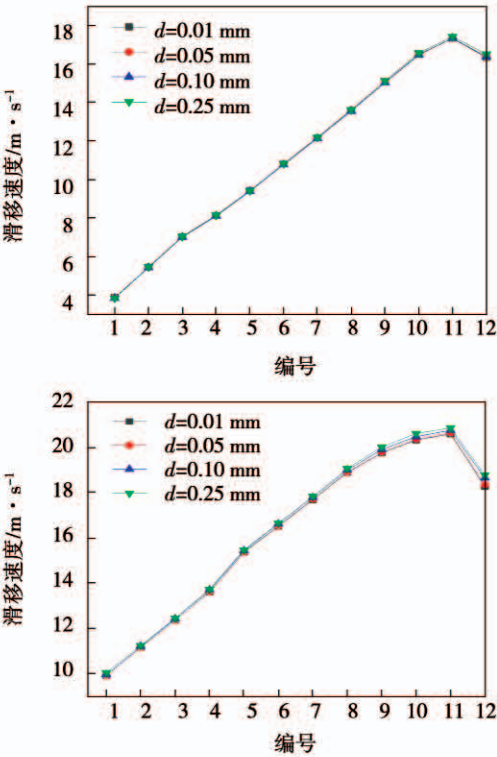
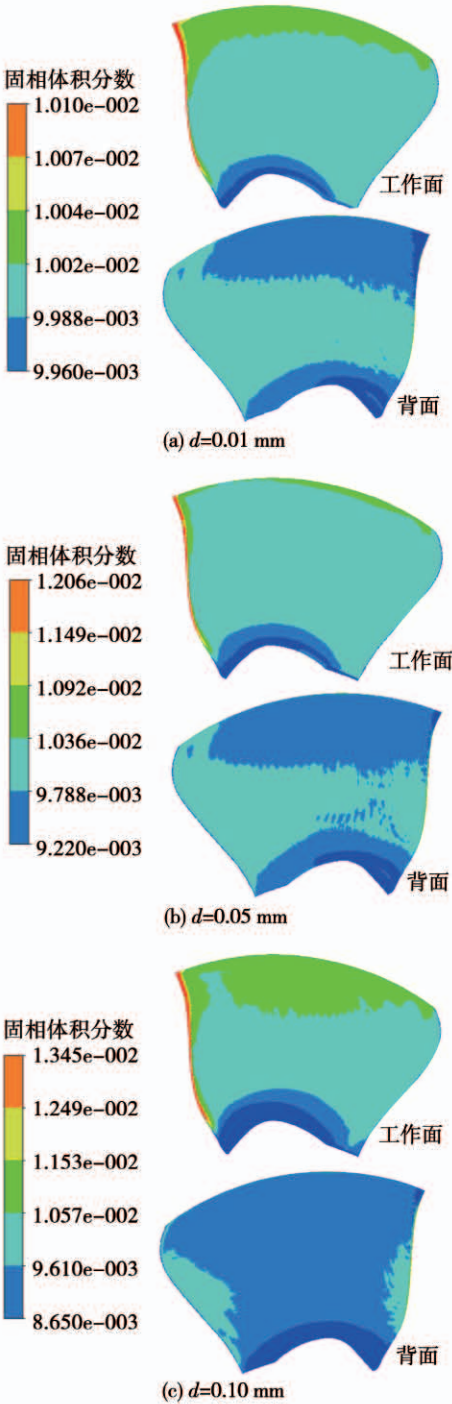


图 6 叶片工作面和背面的滑移速度曲线
Fig.6 Slip velocity curve of blade pressure section and back section

图 7 给出了不同粒径下叶片工作面和背面的固相体积分数分布。由图分析可得,叶片工作面比背面的体积分数大,且固相体积分数最大分布在进水边,最小在轮毂处。固相体积分数沿半径呈均匀增长,在轮缘处达到最大。随着粒径增加,叶片上的体积分数随之增加,这是由于粒径越大,单个固相颗粒质量越大,在流动过程中更容易冲击碰撞附在叶片上。

图 8 为叶片工作面和背面取样点的固相体积分

数图。工作面的固相体积分数沿着半径方向逐渐增大,与滑移速度分布类似,背面体积分数沿着半径分布先增大后减小。随着粒径的增加,工作面体积分逐渐增加,背面体积分逐渐减小。这是因为工作面滑移速度小于背面,泥沙直径的增大,水流对泥沙颗粒的携带作用减弱,固相流动速率小于背面,随着单个颗粒相质量增加,吸附在叶片表面的数量更多,导致工作面的磨损量大于背面。



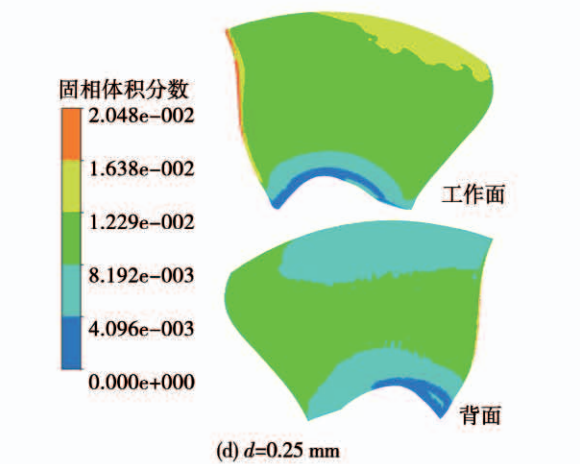


图 7 不同泥沙粒径下的浆叶表面处固相的体积分数分布

Fig. 7 Volume fraction distribution of solid phase at the surface of the blade under different sediment particle sizes

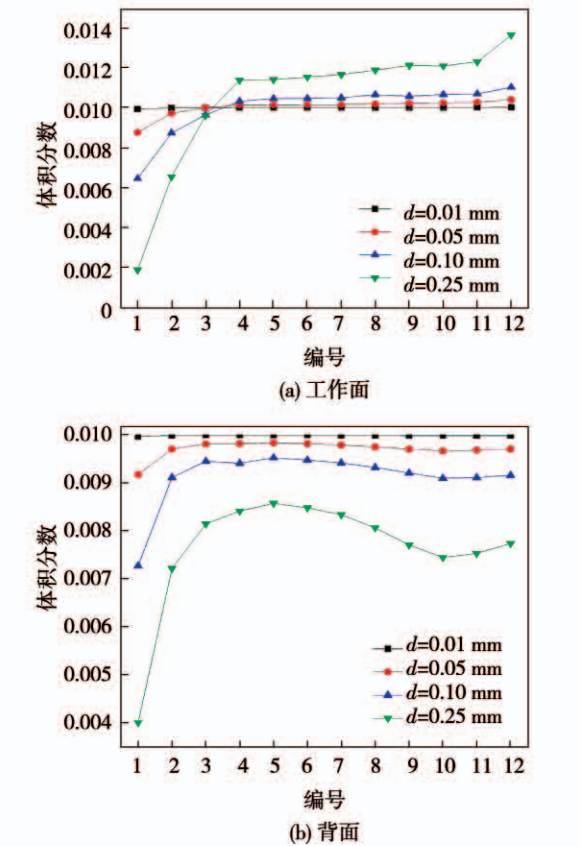


图 8 叶片工作面和背面固相体积分数

Fig. 8 Sediment volume fraction on the pressure and suction surfaces of blade

2.3 导叶表面处固相的滑移速度和体积分数分布

图 9 是不同粒径下,导叶正面和背面的滑移速度分布图。从图中分析可知,导叶正面的滑移速度

比背面小,且背面靠近轮毂处滑移速度最大。随着粒径的增大,导叶上的滑移速度也随之增大。这是由于水流挟带泥沙在运动的过程中,由于惯性力的作用,大粒径的颗粒惯性力更大,产生的速度差也较大。

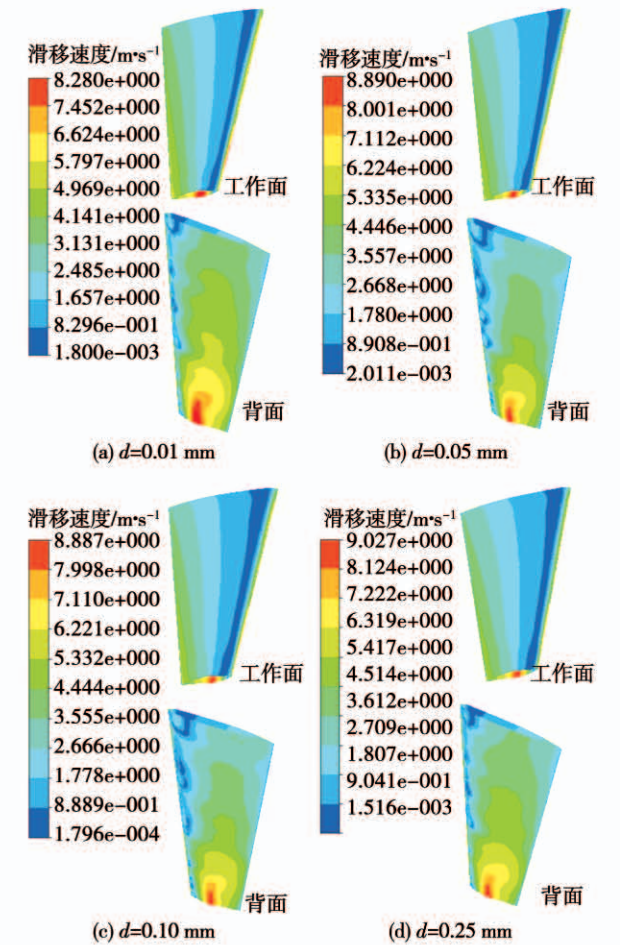


图 9 不同泥沙粒径下的导叶固相的滑移速度分布

Fig. 9 Slip velocity distribution of solid phase on the vane for different sediment particle sizes

图 10 为导叶正面和背面的固相体积分数分布。从图中可以看出,导叶正面的体积分数明显高于背面,在进水边体积分数达到最大,并且各个叶片分布不均。对比发现,当粒径逐渐增大时,导叶上的体积分数也是增大的。这是因为颗粒粒径的增大使得颗粒自身的惯性力变大,颗粒同水流运动的跟随性随之变差,再者,进口进入导叶部分的水流速度较慢,造成较多颗粒的附着。因此粒径越大,导叶的磨损破坏就更为剧烈。

2.4 对效率和出力的影响

对灯泡贯流式水轮机进行固液两相流计算,得到水轮机的工作扬程和转轮转矩,利用式(5)计算

效率:

$$\eta = \frac{M\omega}{\rho gQH} \times 100\% \tag{5}$$

式中: M —转轮转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ρ —密度, kg/m^3 ; Q —进口质量流量, kg/s ; H —有效工作扬程, m ; ω —转轮角速度, r/min 。

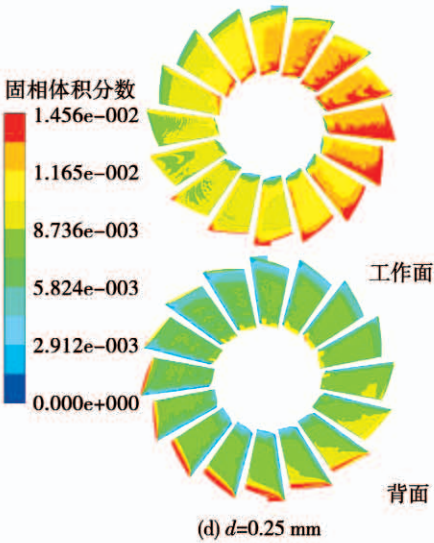
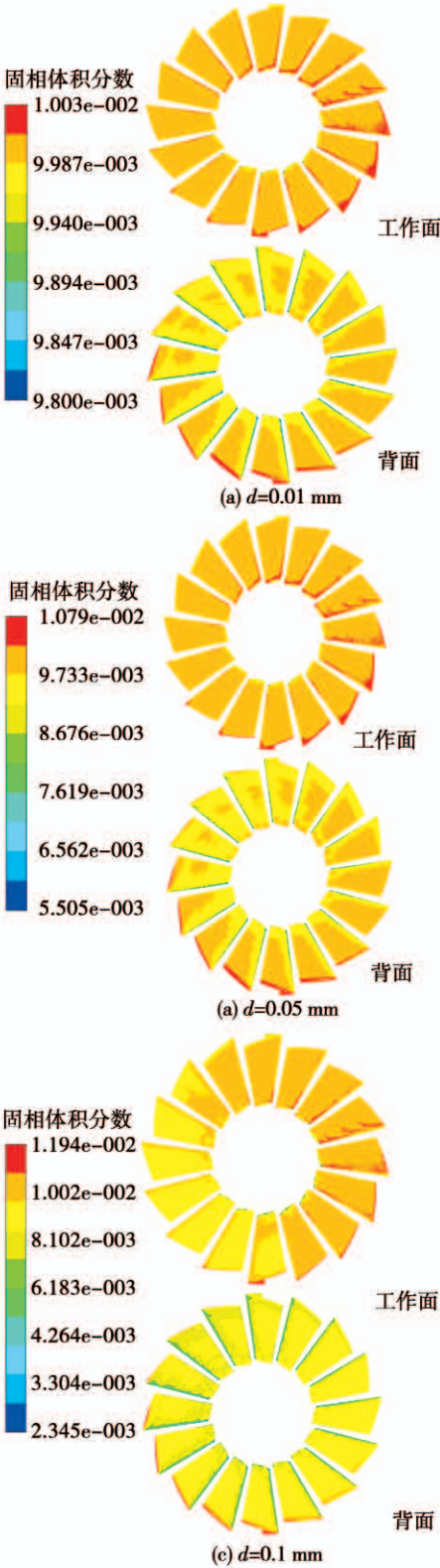


图 10 不同泥沙粒径下的导叶固相的体积分数分布
Fig. 10 Volume fraction distribution of solid phase on the vane for different sediment particle sizes

利用式(6)计算水轮机的出力:

$$P = M \times \omega \tag{6}$$

图 11 为该流量计算工况下,清水和不同粒径颗粒工况所得的性能图。从图中可以清晰地看出,固液工况下,水轮机的效率和出力明显的下降。

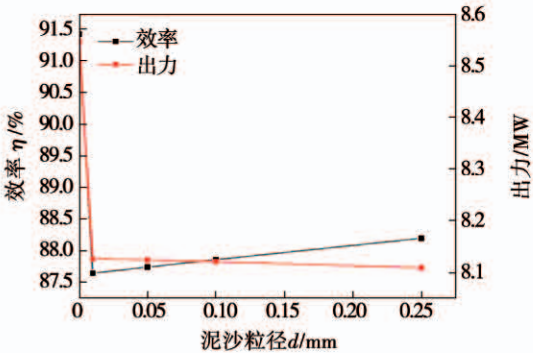


图 11 颗粒粒径与效率、出力关系
Fig. 11 Relationship between particle size and efficiency and output

3 试验验证

水轮机型号为 GZ995 - WP - 720 的主要设计参数如表 2 所示。

试验方法为指数法相对效率试验,通过测量流道压差,计算出指数流量以代替真实流量,其他主要

参数由“机组测试系统”进行采集和处理,最后计算出水轮机的相对效率^[16]。

表 2 灯泡贯流式水轮机的主要技术参数
Tab.2 Main technical parameters of bulb tubular turbine

名称	数值
转轮直径/m	7.2
同步转速/r·min ⁻¹	68.18
单机额定出力/MW	24.65
额定流量/m ³ ·s ⁻¹	399.2
最高扬程/m	10
最低扬程/m	3.1
额定扬程/m	6.8
加权扬程/m	7.68
叶片数	4
导叶数	16
允许吸出高度/m	-8.8
安装高程/m	1 532.2

图 12 为 0.7 Q_d 、0.8 Q_d 、0.9 Q_d 、1.0 Q_d 、1.1 Q_d 和 1.2 Q_d 6 个工况下的数值计算与试验测得流量与效率, Q_d 是设计流量。由图 11 中观察, 6 个工况的计算效率值比试验的数值高, 误差依次为: 4.39%、5.21%、3.79%、3.56%、6.28% 和 5.82%, 各工况的计算效率较为准确。

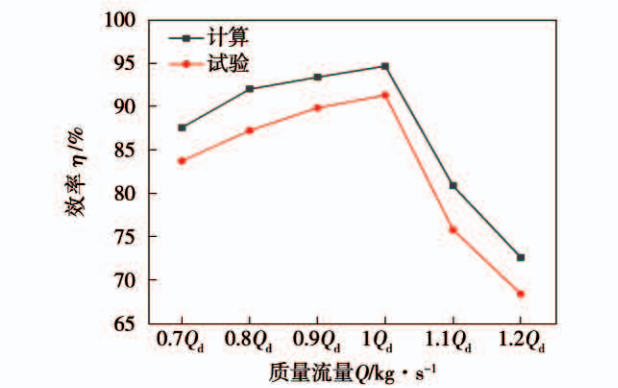


图 12 计算和试验的效率曲线
Fig.12 Computation and test efficiency curve

从图 13 中的现场检修叶片能看到磨损严重部位在进水边和轮缘, 这说明计算得到的体积分数分布与实际磨损破坏相符。在今后的叶片生产中, 可对进水边缘以及轮缘部分进行磨损材料的喷涂加

厚, 增加运行时的使用寿命和安全性。



图 13 真机桨叶磨损照片
Fig.13 Photos of blade wear

4 结 论

- (1) 随着固相颗粒粒径的增大, 桨叶上的滑移速度减小, 而导叶上的滑移速度逐渐增大, 这说明固相粒径在两个部件上的运动和影响是不同的。
- (2) 随着固体颗粒相粒径的增大, 桨叶上固体颗粒相体积分数增大, 最大体积分数出现在桨叶进水边和轮缘处。滑移速度最大值出现在轮缘处。结合现场真机磨损照片, 说明桨叶轮缘确实为破坏最为严重的部位。
- (3) 在导叶上, 随着固体颗粒相粒径的增大, 固体颗粒相体积分数增大, 但各个叶片分布不均匀, 最大体积分数出现在叶片进水边。滑移速度最大值在导叶靠近轮毂处, 这与体积分数分布显示极为相近, 说明轮毂处为泥沙淤积的重要部位。

参考文献:

[1] Noon A A, Kim M H. Erosion wear on Francis turbine components due to sediment flow[J]. Wear, 2017, 378-379: 126-135.
[2] 廖 姣, 张 兴, 张文明. 高水头混流式水轮机内部固液两相流数值分析[J]. 人民长江, 2017, 48(7): 83-87.

- LIAO Jiao, ZHANG Xing, ZHANG Wen-ming. Numerical analysis of internal solid-liquid two-phase flow in high head francis turbine [J]. Yangtze River, 2017, 48(7): 83 – 87.
- [3] 廖 姣, 赖喜德, 张 兴. 泥沙直径和浓度对混流式水轮机转轮内流场的影响[J]. 水力发电学报, 2017(5): 88 – 94.
- LIAO Jiao, LAI Xi-de, ZHANG Xing. Influence of particle diameters and concentration of sediment on internal flows in Francis turbine runners[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017(5): 88 – 94.
- [4] 廖 姣, 赖喜德, 廖功磊, 等. 基于固液两相流的离心泵内部流场数值分析[J]. 热能动力工程, 2017, 32(5): 95 – 99, 139 – 140.
- LIAO Jiao, LAI Xi-de, LIAO Gong-lei, et al. Numerical analysis of internal flow field of centrifugal pump based on solid-liquid two-phase flow [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(5): 95 – 99, 139 – 140.
- [5] 周世杰, 廖伟丽, 赵亚萍, 等. 抽黄工程用离心泵固液两相流数值模拟[J]. 水力发电学报, 2017(5): 95 – 103.
- ZHOU Shi-jie, LIAO Wei-li, ZHAO Ya-ping, et al. Numerical simulations of solid-liquid two-phase flows in centrifugal pumps of a Yellow River pumping project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017(5): 95 – 103.
- [6] 黄剑峰, 张立翔, 姚 激, 等. 水轮机泥沙磨损两相湍流场数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2016(2): 145 – 150.
- HUANG Jian-feng, ZHANG Li-xiang, Yao Ji, et al. Numerical simulation of two-phase turbulent flow in Francis turbine passage on sediment erosion[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016(2): 145 – 150.
- [7] 张自超, 王福军, 陈 鑫, 等. 低浓度固液两相流相间阻力修正模型研究[J]. 农业机械学报, 2016(12): 92 – 98.
- ZHANG Zi-chao, WANG Fu-jun, CHEN Xin, et al. Modified inter-phase drag model for diluted solid-liquid two-phase flow [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016(12): 92 – 98.
- [8] 张 广, 魏显著. 泥沙浓度及粒径对水轮机转轮内部流动影响的数值分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 94 – 100, 340.
- ZHANG Guang, WEI Xian-zhu. Numerical analysis for effects of concentration and diameter of sediment on solid-liquid two-phase flow in hydraulic turbine runner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 94 – 100, 340.
- [9] 施卫东, 邢 津, 张德胜, 等. 后掠式叶片轴流泵固液两相流数值模拟与优化[J]. 农业工程学报, 2014(11): 76 – 82.
- SHI Wei-dong, XING Jin, ZHANG De-sheng, et al. Numerical simulation and optimization of solid-liquid two-phase turbulent flow in back swept axial pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014(11): 76 – 82.
- [10] 张自超, 王福军, 陈 鑫, 等. 基于改进欧拉算法的双吸离心泵泥沙磨损特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 124 – 133, 147.
- ZHANG Zi-chao, WANG Fu-jun, CHEN Xin, et al. Erosion characteristics of double suction centrifugal pump based on modified Eulerian algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 124 – 133, 147.
- [11] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 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(10): 846 – 850.
- WANG Jia-qiong, JIANG Wan-ming, KONG Fan-yu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump based on Particle model [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013(10): 846 – 850.
- [12] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 53 – 60.
- WANG Jia-qiong, JIANG Wan-ming, KONG Fan-yu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow and wear characteristics of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 53 – 60.
- [13] PENG G, WANG Z, XIAO Y, et al. Abrasion predictions for Francis turbines based on liquid – solid two-phase fluid simulations [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 33(7): 327 – 335.
- [14] ANSYS, Inc. ANSYS CFX—solver modeling guide ANSYS, CFX Release 13.0[M]. ANSYS, Inc., 2010.
- [15] ANSYS, Inc. ANSYS CFX—solver theory guide ANSYS, CFX Release 13.0[M]. ANSYS, Inc., 2010.
- [16] 李正贵. 灯泡贯流式水轮机协联关系及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- LI Zheng-gui. The research of combination relationship and performance of bulb-tubular turbine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

(姜雪梅 编辑)