

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.17.0188



水轮机活动导叶端面间隙磨蚀特性数值模拟



韩伟

韩伟^{1,2}, 陈雨¹, 刘宜^{1,2*}, 李光贤¹, 王洁¹, 王腾达¹

(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: 为了研究水轮机活动导叶端面间隙固液两相流动的规律, 以及间隙上下表面的磨损情况, 基于 Fluent 软件的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DPM 模型, 结合水轮机活动导叶端面间隙流的简化模型(圆柱绕流和后台阶流), 数值模拟了不同进口速度下, 沙粒体积分数分别为 1%、5%、7%、10% 以及沙粒粒径分别为 0.020、0.050、0.075、0.100 mm 时, 活动导叶端面间隙的三维非稳态流动。通过定常数值模拟得到不同工况下间隙上下表面的平均磨损率分布, 分析磨蚀规律和磨蚀位置。结果表明: 流场中平均磨损率分布受间隙流模型的结构和两相流参数设置影响较大。随着进口速度和沙粒体积分数增大, 间隙流模型上下表面平均磨损率增大, 磨损主要集中在轴前、台阶下游再附点位置以及间隙流出口处, 最大平均磨损率约为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。随着沙粒粒径增大, 由于惯性力作用, 模型上下表面平均磨损率减小; 在沙粒粒径小于 0.020 mm 时, 磨蚀情况相比其他粒径更严重, 最大平均磨损率约为 0.100 mm 时的 2 倍。

关键词: 水轮机导叶; 间隙流; 平均磨损率; 离散相模型; 数值模拟

中图分类号: TK730 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)05-0404-09

韩伟, 陈雨, 刘宜, 等. 水轮机活动导叶端面间隙磨蚀特性数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(5): 404-412.

HAN Wei, CHEN Yu, LIU Yi, et al. Numerical simulation of end surface erosion characteristics of hydro-turbine guide vane[J].

Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(5): 404-412. (in Chinese)

Numerical simulation of end surface erosion characteristics of hydro-turbine guide vane

HAN Wei^{1,2}, CHEN Yu¹, LIU Yi^{1,2*}, LI Guangxian¹, WANG Jie¹, WANG Tengda¹

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

Abstract: To study the solid-liquid two-phase flow features in the clearances between guide vane end surfaces and casing, as well as the erosion condition of two end surfaces, the unsteady three-dimensional flow in a cylinder and a backward-facing step flow channel, which is a simplified model of the end clearance flow in a real hydro-turbine guide vane, was numerically simulated based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and discrete phase model (DPM) in Fluent. In simulations, the solid particle volume fractions were 1%, 5%, 7% and 10%, the particle diameters were 0.020, 0.050, 0.075 and 0.100 mm, and different inlet velocities were used. Through steady numerical simulations, the distri-

收稿日期: 2017-08-18; 修回日期: 2017-10-28; 网络出版时间: 2018-04-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180425.1417.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51669012); 西华大学重点实验室开放基金资助项目(szjj2017-092)

第一作者简介: 韩伟(1977—)男,安徽砀山人,副教授,博士(hanwei@lut.cn),主要从事水力机械内部固液两相流动理论研究。

通信作者简介: 刘宜(1955—)男,甘肃兰州人,教授级高级工程师(18811212509@163.com),主要从事水力机械流动理论及优化设计方法研究。

bution of average erosion rate on the upper and lower end surfaces was obtained, and the erosion pattern and locations were analyzed. The results indicate that the distribution of average erosion rate in flow field is closely related to the physics models and the parameter settings for the two-phase flow. With increasing inlet liquid velocity and particle volume fraction, the average erosion rate augments. The erosion positions mainly are located in the front of the cylinder, the reattachment point downstream the step and the outlet of the step. The maximum average erosion rate is about $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. With increasing particle diameter, the average erosion rate decreases due to an increasing inertial force. When the particle diameter is less than 0.020 mm, heavier erosion occurs in comparison with the rate at large diameters, particularly, the maximum average erosion rate is about 2 times the rate at 0.100 mm particle diameter.

Key words: hydro-turbine guide vane; clearance flow; average erosional rate; DPM model; numerical simulation

水轮机作为重要的水电设备,已在各大水利水电工程中投入运行。由于部分地区环境较恶劣,河水含沙量增多,黄河年平均过沙量超过 $20 \text{ g}/\text{cm}^3$ ^[1]。在含沙水条件下运行的水轮机,其内部为固液两相流动,沙粒的冲刷和冲击对水轮机的稳定性产生负面影响。活动导叶端面间隙是指活动导叶瓣体端面与顶盖、底环过流面间的间隙。实际工程中,含沙水中的沙粒对活动导叶端面造成磨损,进而使活动导叶间隙增大,使得水轮机机组漏水量增加,效率下降,机组出力减少等;若漏水特别严重,还会导致水轮机的停机导叶关闭后转速不降而无法投入制动^[2-3]。因此,活动导叶端面间隙流动与水轮机机组的正常运行和冲蚀磨损性能有着密切联系。

目前,诸多学者通过试验研究和数值模拟方法对活动导叶间隙流进行了研究。KOIRALA等^[4]通过建立水轮机整机模型,对活动导叶端面间隙网格进行加密处理,数值模拟后得知小间隙会产生泄漏流动,这个二次流动干扰主流,从而引起性能损失。张广等^[5]在含沙水条件下,对水轮机导叶端面间隙流动进行数值研究,得知由于压差的影响,含沙水从导叶间隙的压力侧流向吸力侧,导叶间隙的增加使得间隙内部含沙水流速增大。THAPA等^[6-7]设计出一种低比转速混流式水轮机的导叶叶栅,对水轮机活动导叶间隙的磨蚀情况进行研究,得知侵蚀导致间隙增大,间隙尺寸扩大出现横向流动;提出了水轮机的优化设计方案,并采用试验研究方法对2 mm的水轮机导叶间隙进行泄漏量和压力的测量,分析得出泄漏流动为射流并导致叶片处流动不均匀。

水轮机活动导叶端面间隙流可以简化成圆柱绕流和台阶流动。国内许多学者对于两者在固液两相流下的磨损做了很多研究工作。王威^[8]通过建立某海洋平台立管的模型,研究圆柱绕流的圆柱阻力

系数和雷诺数之间关系。魏治强等^[9]利用 Mixture 多相流模型,对圆柱后台阶两相绕流流动进行数值计算,得出由于流场内圆柱的存在导致过流面积突然减小,泥沙沙粒在圆柱前端及后台阶区域内存在集中,固液混合流体对材料的磨损和冲蚀产生最大值的结论。邱晓等^[10]采取欧拉-拉格朗日耦合算法,对后台阶分离流动中沙粒扩散运动进行数值研究。在固液两相流对于流体过流部件磨损的研究方面,ZHANG等^[11]采用 Mixture 模型对离心泵进行研究,分析了不同沙粒粒径、密度和体积分数对于泵水力性能的影响。HUANG等^[12]采用离散相模型(DPM)结合半经验的磨损模型,计算模拟了粒径为0.05~0.20 mm,泵进口颗粒体积率为0.5%~3.0%时,离心泵内固液两相流场特性。

虽然国内外诸多学者对水轮机的磨蚀问题进行了广泛研究,但是对于活动导叶端面固液两相流间隙造成的磨损破坏流动过程和磨蚀流动机理研究甚少。因此,文中运用 CFD 数值模拟方法,以水轮机活动导叶端面固液两相间隙流为研究对象,通过改变不同间隙流流动参数(进口速度、沙粒体积分数和沙粒粒径),研究分析水轮机活动导叶上表面和顶盖下表面的磨损情况、活动导叶端面固液两相间隙流的流动情况,从而揭示水轮机活动导叶端面间隙流动规律和磨蚀情况,为水轮机活动导叶端面的结构设计和磨蚀防护等提供理论参考。

1 数学模型的建立及方法

1.1 基本假设

以含沙水流为介质,水轮机活动导叶端面间隙流动为复杂的固液两相流动,其中包括钝体绕流和后台阶流。为了实现其端面间隙流道内的固液两相

流动数值模拟, 现作如下假设:

1) 固液两相分别是清水相(不可压缩流体)和沙粒相(离散介质), 且每相的物理特性均为常数, 其中沙粒粒径均匀且为球形.

2) 间隙流动进口固液两相没有速度滑移, 即沙粒随清水运动, 它们的进口速度大小和方向一致.

1.2 数值计算模型

图1为模型表示区域. 水轮机活动导叶端面间隙流可以简化为圆柱绕流和前后台阶流的结合.

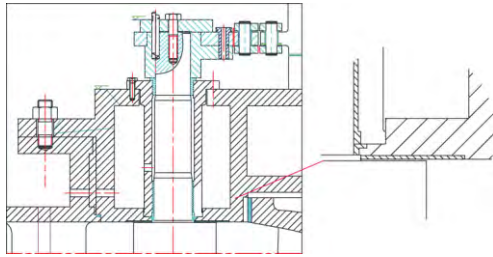


图1 模型表示区域

Fig. 1 Representational area of model

实践证明, 活动导叶轴前的前台阶流对活动导

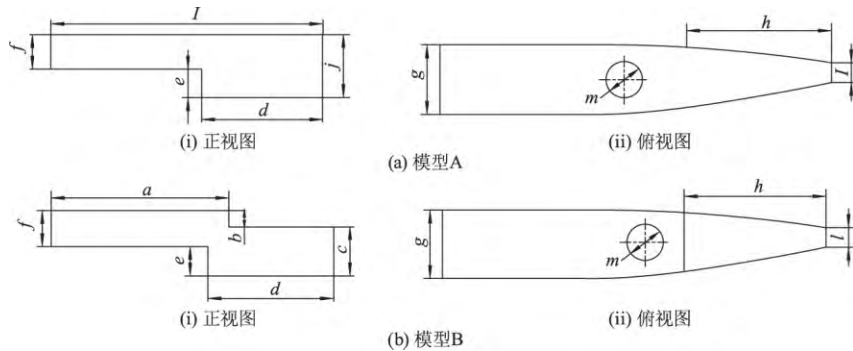


图2 间隙流区域简化模型

Fig. 2 Simplified model of clearance flow region

表1 模型A、B的主要几何参数

Tab. 1 Main geometric parameters of model A and B

		mm	
定义名称	尺寸符号	数值	
顶盖下表面(间隙流上表面)(模型B)	顶盖轴面	a	54.2
	顶盖台阶面: 上台阶处	b	2.0
	顶盖端面: 上台阶下游	h	31.8
顶盖下表面(间隙流上表面)(模型A)	高	l	86.0
间隙流进口(f, g)	高	f	11.0
	宽	g	15.3
间隙流出口(c, d)	高(模型B)	c	15.0
	高(模型A)	j	20.0
	宽	l	2.0
活动导叶上表面(间隙流下表面 e, d)	活动导叶台阶面: 下台阶处	e	9.0
	活动导叶端面: 下台阶下游	d	38.0
活动导叶转轴(圆柱)	m	8.0	

采用ICEM(integrated computer engineering and manufacturing)对间隙流模型进行结构化六面体网

格划分. 模型A、B网格划分如图3所示.

叶端面间隙上下表面磨损影响较轻, 因此文中只考虑间隙流中的圆柱绕流和后台阶流对活动导叶端面间隙上下表面的影响. 以国内某电站HLA351-LJ-180型水轮机为研究对象, 活动导叶的结构参数参考该水轮机零件图, 间隙的具体尺寸参考导水机构部件图. 该间隙是活动导叶端面与顶盖过流面间的间隙, 其中圆柱绕流为流体绕活动导叶转轴的流动, 台阶为活动导叶和顶盖台阶面. 数值计算模型尺寸按实际尺寸进行近似相似换算. 由于相对于整个活动导叶, 活动导叶端面间隙是一个很小的尺寸, 小尺寸间隙和大尺寸间隙相比, 两者的数值计算网格尺寸相差大, 小尺寸间隙的计算工作量大, 因此在保证流动相似的前提下, 适当放大间隙尺寸. 先假设2种模型A和B, 不同之处在于模型A不考虑间隙流上表面的台阶面. 模型进口计算域为正方体, 固液两相流体平稳进入间隙. 轴后计算域考虑实际为该水轮机组活动导叶翼型. 水轮机活动导叶端面间隙流域模型A、B计算域视图如图2所示, 主要几何参数见表1.

格划分, 模型A、B网格划分如图3所示.

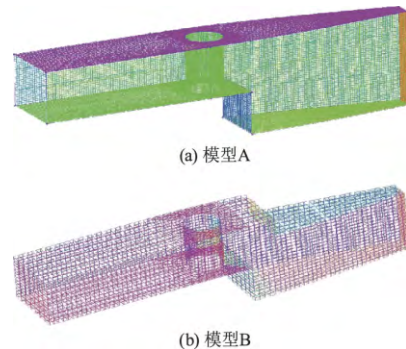


图3 模型计算域网格

Fig. 3 Computational domain and mesh of model

考虑无关性检验, 最终模型A、B确定的网格单元总数分别为396 082、441 303.

1.3 边界条件和初始条件

将水轮机活动导叶端面间隙流视为低速不可压缩流动,计算域入口边界采用速度进口,通过对水轮机整机进行数值模拟得到活动导叶不同开度下间隙流的进口速度,入口面压力为 1.9 MPa;出口边界采用自由出流.清水相密度为 998.2 kg/m^3 ,黏度为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,考虑沙粒受重力的影响,重力加速度 g 为 9.81 m/s^2 .沙粒密度为 2650 kg/m^3 .

入口处设置为固相入射面源,且沙粒在入口处均匀分布.壁面边界采用无滑移边界条件,间隙流壁面 DPM 边界采用反射边界,沙粒在此壁面处反弹并发生动量变化,出口和计算域壁面 DPM 边界采用逃逸边界.

1.4 数值计算方法

数值模拟采用 Ansys - Fluent 软件,基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DPM 模型,使用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程组,压力项、动量项、湍动能与湍流耗散率项均采用二阶迎风格式.

拉格朗日的“DPM 离散相模型”,计算中将液相视为连续介质,求解欧拉坐标系下的流体控制方程;把固体沙粒相视为离散介质,在拉格朗日坐标系下求解沙粒运动方程,采用迭代计算进行固液两相的耦合^[13].

平均磨损率^[14]定义为

$$I_R = \sum_{p=1}^{N_{\text{part}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}}$$

式中: I_R 为单位面积壁面的磨损速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{part} 为单元面积碰撞的沙粒数目; m_p 为碰撞沙粒的质量流率, kg/s ; $C(d_p)$ 为与沙粒粒径相关的函数; d_p 为沙粒中值直径; α 为沙粒对壁面的冲击角; $b(v)$ 为此相对速度的函数,取 1; v 为沙粒相对于壁面的速度; A_{face} 为壁面计算单元面积, m^2 .

2 计算结果分析

2.1 速度流场特性

图 4 为活动导叶端面间隙流模型 A、B 定常流动时的流场模拟结果.图 4a 为模型 A 活动导叶端面间隙面 YZ 和 ZX 的速度流线图.固液两相流绕流圆柱体时,流动区域由柱体前驻点开始向下游逐渐扩大到转轴后方的尾迹中,由于存在黏性力,柱体周围形成边界层分离并出现交错排列的卡门涡街.随后,流体越过台阶,流动发生分离,在台阶下游形

成剪切层;在距离台阶一定距离处,流动失去稳定状态形成三维涡结构,从而形成回流区.回流涡的尺寸与台阶高度一致.来流与壁面作用产生的涡经过相互作用,充分发展成湍流场.回流涡继续往下游传播,速度剖面中会出现强剪切层,接着剪切层卷起,形成大尺度的流动结构.其中包含许多小涡的大尺度流动结构向下游不断增大并与壁面发生作用,并在继续向下游运动的过程中逐渐耗散形成再附点;而后流体流出间隙流出口,由于活动导叶翼型流道区域变窄,出口处速度增加.

图 4b 为模型 B 面 YZ 和 ZX 的速度流线图,与图 4a 比较,流动状态大致相同,台阶下游上壁也产生回流涡,同样经历分离、再附的过程,但是后台阶的回流涡不稳定、形状不规则,回流区域减小.

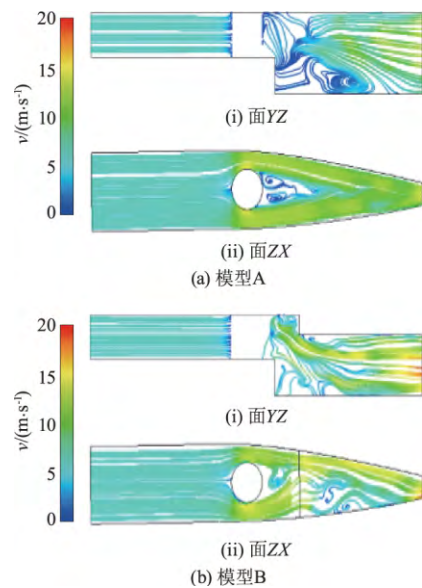


图 4 模型 A、B 速度流线图

Fig. 4 Velocity streamlines of model A and B

模型 A 相对于 B 结构较简单,流动状态两者大致相同.模型 A 不考虑上台阶面,因此部分流体流过转轴后,平稳地流过活动导叶间隙.由于工况较多,因此文中仅列出模型 B 在不同工况下的速度流线图.

图 5 为不同工况下模型 B 活动导叶间隙流在面 YZ 和 ZX 的速度流线图,图中 φ 、 D 分别为沙粒体积分数、沙粒粒径.

由图 5a 可以看出,随着进口速度增大,活动导叶端面间隙流流动状态越紊乱,流体绕过转轴后的对称卡门涡街越明显,回流涡的涡结构越不规则,流线复杂,涡的数量增多.由图 5b 可以看出,随着沙粒体积分数增大,沙粒与沙粒、沙粒与固体壁面相

互碰撞概率逐渐增大,速度流线变得紊乱,尤其在转轴后区域.由图 5c 可知,随着沙粒粒径增加,沙粒所具有的惯性也随之增大,沙粒对于间隙流壁面的磨损也增加.沙粒粒径越小时,沙粒对液体的跟随性越好,因此沙粒与间隙壁面碰撞相对较少,导致磨蚀减轻.

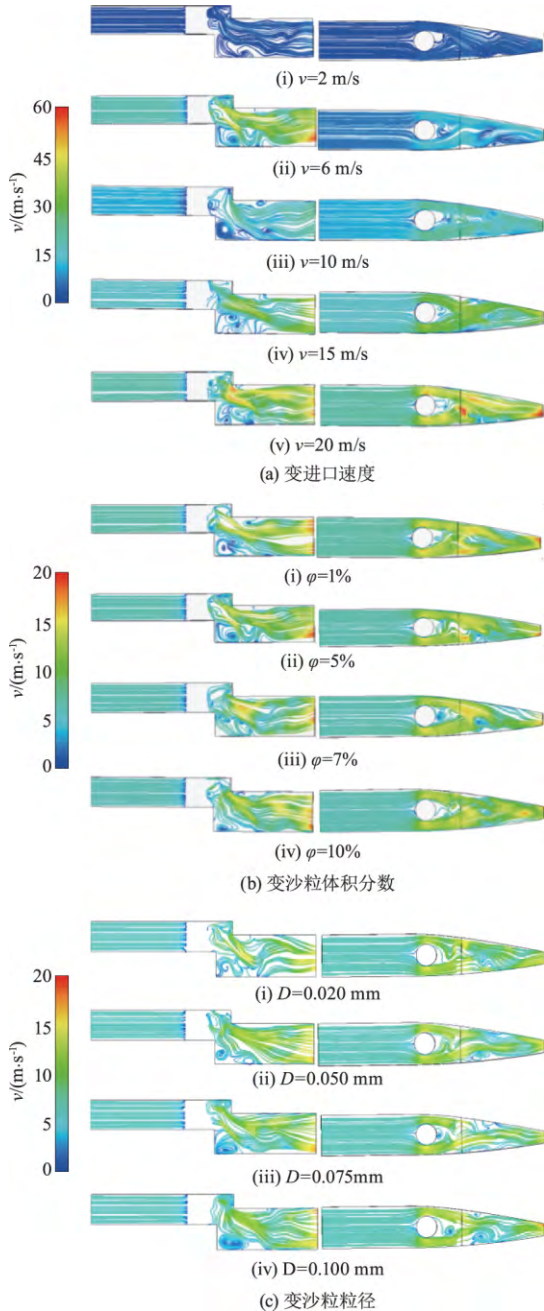


图 5 变工况下模型 B 的速度流线图

Fig. 5 Velocity streamlines of model B under variable conditions

2.2 进口流速对间隙上、下表面冲蚀磨损的影响

在固液两相流场中,设置沙粒体积分数为 7%,沙粒粒径为 0.050 mm,分别计算进口流速 (v) 为 2, 6, 10, 15, 20 m/s 的 5 个工况下模型 A, B 活动导叶端

面间隙的固液两相流动,分析活动导叶端面间隙流上下表面的磨损分布规律.不同进口流速情况下,模型 A, B 活动导叶端面间隙流下表面的磨损率云图如图 6 所示;活动导叶端面间隙流上表面的磨损率云图如图 7 所示.

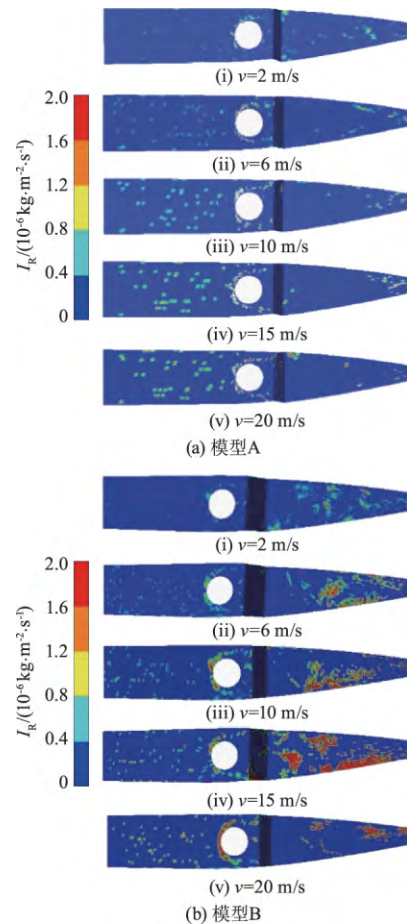


图 6 变流速下模型 A, B 下表面的磨损率云图

Fig. 6 Erosion rate contours on lower end surface of model A and B at variable flow velocities

由图 6a 可以看出,固液两相流流速对活动导叶端面间隙流下表面磨损影响显著,沙粒对间隙流下表面的磨损多集中于轴前端及下台阶活动导叶出口区域,此两处沙粒堆积较多;台阶下游的回流区沙粒几乎没有堆积,沙粒集中在涡的外缘,此处磨损也少.随着流速增大,活动导叶端面轴前磨损区域增大,磨损逐渐扩散到下台阶区域.究其原因,固液两相流流体以一定的速度进入间隙,流过一段距离由于转轴而发生圆柱绕流,沙粒撞击轴使轴产生磨损,沙粒速度越大,对轴的冲击越大,磨损越严重;随后发生台阶流,由于后台阶下游产生稳定的回流区,回流区产生回流涡,涡产生之处一般沙粒不附着.在再附点附近,活动导叶端面轴因沙粒速

度大而产生磨损,再附点附近由于间隙流计算域出口处的活动导叶翼型原因,流道是减缩的,沙粒冲刷壁面产生磨损。

图6b中,由模型B在与图7相同标尺下的磨损率云图可以看出,模型B下台阶下游上壁的流道形状改变对磨损产生了很大影响,上壁面结构改变使得下台阶的回流区域减小,对间隙流下表面的磨损加重,随着速度增大,磨损面积增大、磨损量增多,但当速度增大到20 m/s,下台阶下游逆压区产生,磨损面积较之前有所减少。

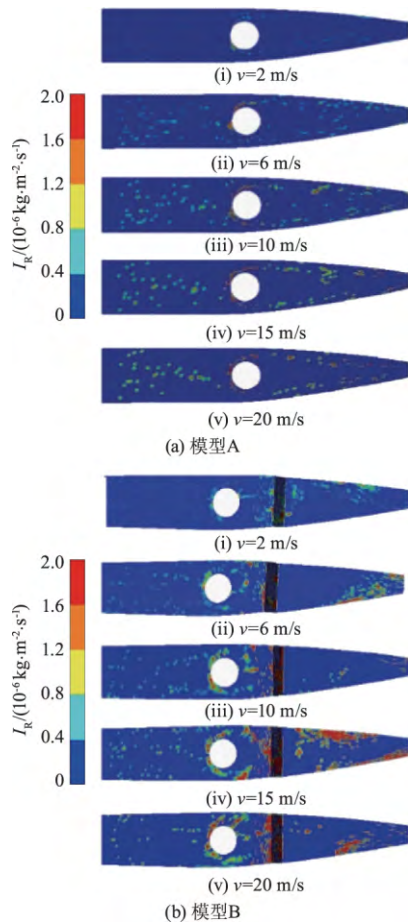


图7 变流速下模型A、B上表面的磨损率云图

Fig. 7 Erosion rate contours on upper end surface model A and B at variable flow velocities

由图7a可以看出,固液两相流流速对活动导叶端面间隙上表面磨损影响显著,沙粒对间隙上表面的磨损多集中于轴前端及活动导叶翼型出口。随着流速增大,固液两相流流体由于转轴而发生圆柱绕流,沙粒撞击轴使轴产生磨损;圆柱体后部旋涡生成、长大和脱落,在涡的周围沙粒速度小的区域,壁面因沙粒碰撞而产生磨损。活动导叶翼型流道缩小,沙粒撞击而使壁面产生磨损。

图7b中,由模型B在与图7a相同标尺下的磨

损率云图可以看出,上壁面结构改变使得流体流经后台阶时先冲击上壁面,速度越大,上壁面磨损越严重,上、下壁面的回流区产生回流涡,沙粒不附着,并且沙粒速度越大,再附点附近磨损面积越大。

不同流速情况下,模型A、B活动导叶端面上、下表面的平均磨损率 I_a 比较如图8所示。模型B的平均磨损率比模型A的大。模型A,当间隙流来流速度为4~20 m/s时,活动导叶端面下表面的平均磨损率小于活动导叶端面上表面的平均磨损率;而对于模型B,无论流速大小,活动导叶端面下表面的平均磨损率都小于活动导叶端面上表面的平均磨损率。

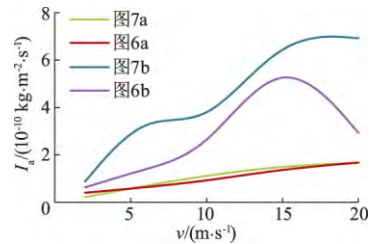


图8 变流速下模型A、B上、下表面的平均磨损率

Fig. 8 Average erosion rate on two end surfaces of model A and B at variable flow velocities

2.3 沙粒体积分数对上、下表面冲蚀磨损的影响

在固液两相流场中,设置进口速度为6 m/s,沙粒粒径为0.050 m,分别对沙粒体积分数 φ 为1%、5%、7%、10%时,模型A、B活动导叶端面间隙的固液两相流动进行数值模拟,分析活动导叶端面间隙上、下表面的磨损分布规律。同一粒径、不同沙粒体积分数时模型A、B间隙下表面的磨损率云图如图9所示;模型A、B间隙上表面的磨损率云图如图10所示。

由图9、10可知,间隙上、下表面的磨蚀形状为麻点和条纹磨蚀带,并且沙粒体积分数为5%时的磨损率几乎是1%时磨损率的2倍,但当沙粒体积分数逐渐增大到10%时,不同位置磨损区域显示为大致相同,磨损率数量级没有太大变化,磨损位置受沙粒体积分数的影响很小,活动导叶端面间隙下表面受磨损的位置没有太大变化,并且均为活动导叶轴前端、后台阶处以及台阶下游出口附近的磨损最严重。

图9b中,模型B后台阶下游磨损比图9a模型A的严重,台阶下游上壁面的结构改变削弱了流体流经后台阶的速度,回流涡变小,磨损面积增大。沙粒体积分数增大到10%时,后台阶处沙粒体积分数

增大削弱了回流涡产生的影响,沙粒由于重力作用,使磨损面积增大。

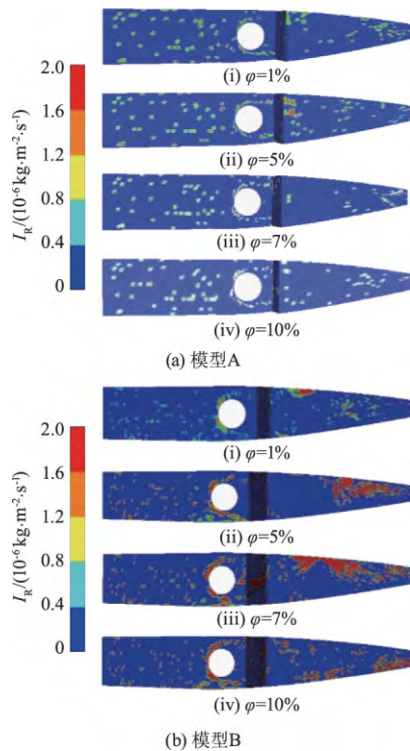


图 9 沙粒体积分数对模型 A、B 下表面的磨损率云图
Fig. 9 Erosion rate contours on lower end surface model A and B at variable particle volume fractions

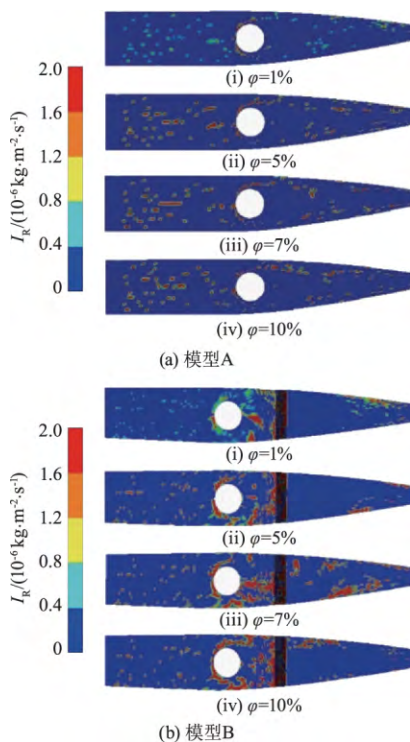


图 10 沙粒体积分数对模型 A、B 上表面的磨损率云图
Fig. 10 Erosion rate contours on upper end surface model A and B at variable particle volume fractions

对于间隙上表面的磨损,由图 10 可以看出,由于模型 A、B 结构不同,磨损分布区域在后台阶区出现不同,磨损位置及原因与改变进口速度时的磨损情况大致一致,在这里不重复描述。不同之处在于,沙粒体积分数改变对圆柱绕流后面的磨损改变很大,体积分数增大,绕过圆柱的沙粒增多,磨损面积增大。

图 11 为沙粒体积分数对模型 A、B 上、下表面的平均磨损率。由图可知,随着沙粒体积分数增大,撞击模型 A 间隙上、下表面的沙粒数增多,对顶间隙上、下表面造成更加严重的磨损伤害,出现较深的条纹状磨损带。随着沙粒体积分数增大,含沙水流体对于模型 B 活动导叶上、下表面的平均磨损率大于模型 A 的平均磨损率。模型 B 活动导叶上、下表面的平均磨损率先加速增大,当沙粒体积分数大于 8% 时,活动导叶上表面的平均磨损率增大幅度有所减小,而活动导叶下表面的平均磨损率略有下降。

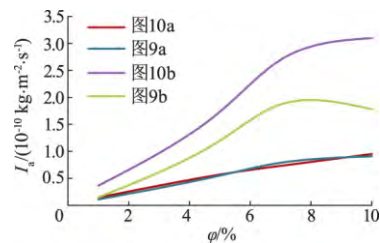


图 11 沙粒体积分数对模型 A、B 上、下表面的平均磨损率
Fig. 11 Average erosion rate on two end surfaces of model A and B at variable particle volume fractions

2.4 沙粒粒径对上、下表面冲蚀磨损的影响

在固液两相流场中,设置沙粒体积分数为 7%、进口速度为 6 m/s,分别数值模拟沙粒粒径 D 为 0.020、0.050、0.075、0.100 mm 时模型 A、B 活动导叶端面间隙的固液两相流动,分析活动导叶端面间隙上、下表面的磨损分布规律。不同沙粒粒径,间隙下表面的磨损率云图如图 12 所示,间隙上表面的磨损率云图如图 13 所示。

由图 12、13 可以看出,沙粒粒径对间隙上、下表面的磨损有非常显著的影响,随着流经间隙流的沙粒粒径增大,叶片磨损位置基本不发生改变,活动导叶端面间隙上、下表面磨损最严重部位都发生在轴前端和后台阶出口处。但值得注意的是,粒径增大并没有使间隙流上、下表面的磨损加剧,反而减少。究其原因是由于惯性力作用,当水流速度一定时,固相沙粒随液相流体的跟随性减弱,固相沙粒粒径增大,速度减小,从而磨损也减少。

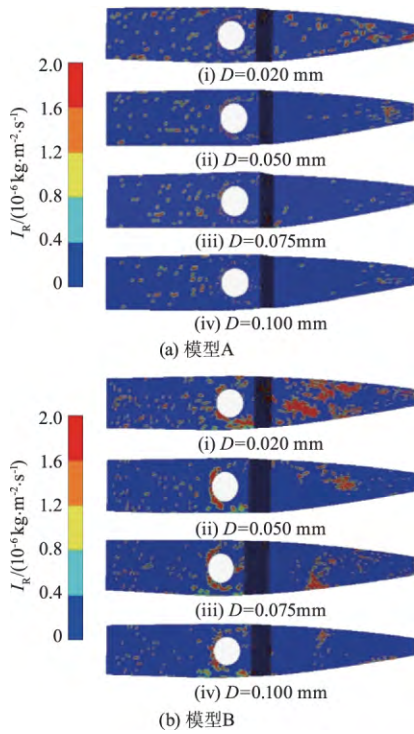


图 12 沙粒粒径对模型 A、B 下表面的磨蚀率云图
Fig. 12 Erosion rate contours on lower end surface model A and B at variable particle diameters

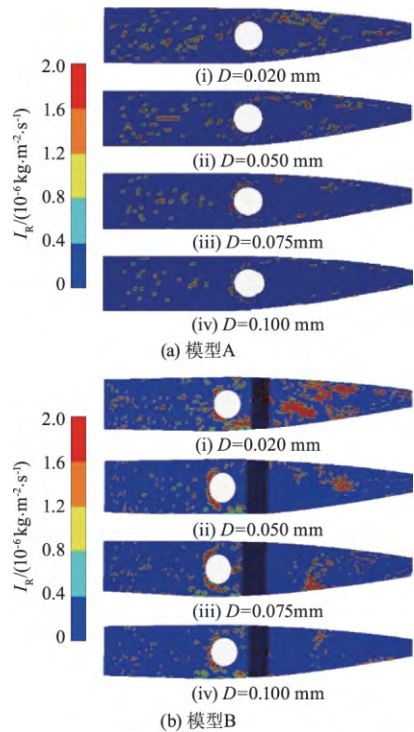


图 13 沙粒粒径对模型 A、B 上表面的磨蚀率云图
Fig. 13 Erosion rate contours on upper end surface model A and B at variable particle diameters

图 14 为沙粒粒径对模型 A、B 上、下表面的平均磨蚀率。由图可知，在相同标尺下，模型 B 的磨蚀面积分布明显大于模型 A 的，粒径增大，间隙流上、

下表面的磨蚀呈现减少趋势。模型 B 后台阶上壁面结构改变，使得壁面阻挡沙粒运动，沙粒冲撞壁面使其磨蚀严重。在沙粒粒径为 0.020 mm 时，间隙下表面的影响最为严重。究其原因，沙粒粒径很小时，沙粒的离心力和惯性力都比较小，沙粒与流体流动的跟随性最好，沿着与液体流线重合的轨迹跟液体一起运动，所以在整个流场沙粒分布比较均匀，磨蚀面积也大。

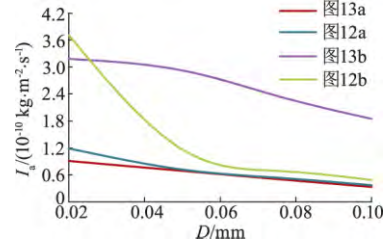


图 14 沙粒粒径对模型 A、B 上、下表面的平均磨蚀率
Fig. 14 Average erosion rate on two end surfaces of model A and B at variable particle diameters

3 结 论

基于 DPM 模型，构造了水轮机活动导叶端面泥沙流动数值计算模型，通过分别改变进口流速、沙粒体积分数和沙粒直径，探讨其对水轮机活动导叶上表面和顶盖下表面磨蚀位置及磨蚀情况的影响，并总结其磨蚀规律，为水轮机在不同真实环境下的安全运行提供参考，为端面间隙的结构设计、磨蚀防护和材料选择等方面提供理论参考。所得到的主要结论如下：

1) 随着进口速度增大，间隙上、下壁面平均磨蚀率增大，活动导叶端面间隙流模型 A 的磨蚀主要集中在轴前、台阶下游再附点区域以及间隙流出口；模型 B 的磨蚀与模型 A 磨蚀区域一致，但由于台阶下游上壁面结构改变，磨蚀在台阶上壁面明显增加，回流区由于回流涡的减少，台阶下游磨蚀面积增大。

2) 随着沙粒体积分数增大，间隙上、下壁面平均磨蚀率增大，磨蚀位置与进口速度工况改变的位置相同，沙粒体积分数为 5% 时的磨蚀率几乎是 1% 时磨蚀率的 2 倍。沙粒体积分数改变对圆柱绕流后面的磨蚀改变很大，磨蚀面积增大。模型 B 后台阶下游磨蚀比模型 A 的严重，台阶下游上壁面的结构改变削弱了流体流经后台阶的速度，磨蚀面积增大。

3) 随着沙粒粒径增大，磨蚀位置与进口速度工

况改变的位置相同;由于惯性力作用,沙粒的跟随性随着沙粒粒径增大而减弱,因此活动导叶间隙上、下表面平均磨损率减小。在沙粒粒径为 0.020 mm 时,由于沙粒粒径很小,沙粒的离心力和惯性力都比较小,沙粒与流体流动的跟随性最好,沙粒分布均匀,磨损面积大,磨损情况较其他粒径相比最大。模型 B 的磨损面积分布明显大于模型 A 的。

参考文献(References)

- [1] 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.
YANG Congxin, DONG Fudi, CHENG Xiaorui, et al. Numerical analysis of effect of sand particle size of silt-laden water flow on wear characteristics of centrifugal pump impeller [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(4): 45-50. (in Chinese)
- [2] THAPA B S, THAPA B, ELEVIK M, et al. Optimizing runner blade profile of Francis turbine to minimize sediment erosion [C]//Proceedings of 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. [S. l.]: IOP Publishing Ltd., 2012.
- [3] 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,2016,34(2):145-150.
HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, 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, 34(2): 145-150. (in Chinese)
- [4] KOIRALA R, ZHU Baoshan, NEOPANE H P. Effect of guide vane clearance gap on Francis turbine performance [J]. Energies, 2016, 9(4): 275.
- [5] 张广,魏显著,宋德强. 导叶端面间隙泥沙磨损数值预测研究[J]. 大电机技术,2017(3):64-68.
ZHANG Guang, WEI Xianzhu, SONG Deqiang. Numerical study on solid-liquid two-phase flow in Francis turbine runner [J]. Large electric machine and hydraulic turbine, 2017(3): 64-68. (in Chinese)
- [6] THAPA B S, DAHLHAUG O G, THAPA B. Velocity and pressure measurements in guide vane clearance gap of a low specific speed Francis turbine [C]//Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49(6): 1-10.
- [7] THAPA B S, DAHLHAUG O G, THAPA B. Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of Francis turbine [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 49: 1100-1113.
- [8] 王威. 圆柱绕流数值模拟[J]. 辽宁化工,2016(7):877-878.
WANG Wei. Numerical simulation of flow around a circular cylinder [J]. Liaoning chemical industry, 2016(7): 877-878. (in Chinese)
- [9] 魏治强,郝晓青,杜俊杰. 浅析基于 Mixture 模型的固液两相流[C]//第十三届沈阳科学学术年会论文集(理工农医). 沈阳: 沈阳农业大学出版社,2016: 743-747.
- [10] 邱晓,丁珏,王忠杰,等. 湍流分离流中沙粒的扩散机制[J]. 上海大学学报(自然科学版),2016,22(5):586-596.
QIU Xiao, DING Jue, WANG Zhongjie, et al. Particles diffusion mechanism in turbulent separation flow [J]. Journal of Shanghai University (natural science edition), 2016, 22(5): 586-596. (in Chinese)
- [11] ZHANG Yuliang, LI Yi, ZHU Zuchao, et al. Computational analysis of centrifugal pump delivering solid-liquid two-phase flow during startup period [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2014, 27(1): 178-185.
- [12] HUANG Si, ZOU Wenlang, ZHOU Jinju, et al. Unsteady numerical simulation on solid-liquid flows and wear in a centrifugal pump based on DPM model [J]. Machine tool & hydraulics, 2016, 44(6): 1-5.
- [13] ANSYS Inc. Ansys Fluent 12.0: theory guide [M]. [S. l.]: ANSYS Inc, 2009.
- [14] 李亮,申龙涉,范开峰,等. 弯管中多相流冲刷腐蚀数值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报,2014,34(3):48-52.
LI Liang, SHEN Longshe, FAN Kaifeng, et al. Numerical simulation of bend multiphase flow erosion [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2014, 34(3): 48-52. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)