

多沙河流水轮机活动导叶泥沙磨损 数值模拟研究

张雷^{1,4}, 曹尊毅^{1,2}, 王金亮³, 汪生彪⁵, 杨志贤⁵, 石广帅⁶

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

3. 黄河万家寨水利枢纽有限公司, 山西 太原 036412;

4. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003;

5. 新疆华电沙尔布拉克水电有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830092;

6. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 多沙河流水电站水轮机活动导叶磨损严重, 导致机组出现“潜动”现象, 甚至危及机组安全运行。为了揭示小开度工况下导叶区域的流动特性以及磨损特性, 建立了万家寨原型水轮机全流道三维水体模型, 采用 DPM 模型和标准 湍流模型对四种小开度工况进行了固液两相流数值模拟计算, 结果表明: 10% 开度工况与 40% 开度工况相比, 叶栅流道的流态变差, 导叶区域的流速和压强变化梯度增大, 导叶立面密封位置两侧压力差由 48 kPa 增加到 108 kPa, 立面密封处流速由 18 m/s 增加到 24 m/s; 在 10% 开度工况下, 叶栅流道狭窄, 含沙水流在活动导叶出口形成射流磨损, 导致活动导叶迎水面的头部和出水边以及背水面立面密封位置处磨损严重, 随着导叶开度增大, 活动导叶表面的磨损程度以及磨损区域都逐渐减小。本研究对于多泥沙电站水轮机稳定运行以及活动导叶的磨损防护具有重要意义。

关键词: 活动导叶; 立面密封; DPM 模型; 数值模拟; 泥沙磨损

中图分类号: TV734.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0001—07

Numerical Simulation of Wear of the Movable Guide Vane of Turbine in Sediment-laden River

ZHANG Lei^{1,4}, CAO Zunyi^{1,2}, WANG Jinliang³, WANG Shengbiao⁵, YANG Zhixian⁵, SHI Guangshuai⁶

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Yellow River Wanjiashai Water Multi-purpose Dam Project Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 036412, China;

4. He'nan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Test and Protection, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

5. Xinjiang Huadian Shaerbulak Hydropower Co., Ltd., Wulumuqi, Xinjiang 830092, China;

6. He'nan Zhihe Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: Serious wear of the movable guide vanes of the hydraulic turbine in the sediment-laden river power station, resulting in violent vibration of the turbine unit, even endangering the safe operation of the unit. In order to reveal the flow characteristics and wear characteristics of the guide vane area under small opening conditions, this paper establishes a three-dimensional water model of the full flow passage of the Wanjiashai prototype turbine, and DPM model and standard turbulence model was used to simulate the solid-liquid two-phase flow for four small opening conditions. The results show that: the opening degree is reduced from 40% to 10%, the flow in the guide vane channel is gradually de-

teriorates, and the change gradient of flow velocity and pressure in the guide vane area gradually increase, the pressure difference on both sides of the guide vane vertical sealing position is increased from 48 kPa to 108 kPa, and the velocity at the vertical sealing position is increased from 18 m/s to 24 m/s; Under the condition of 10% opening, the flow channel in the guide vane area is narrow, and the sand-laden water flow forms jet wear at the outlet of the movable guide vane, the head and tail of the movable guide vane and the sealing position of the facade are severely worn, with the increase of the guide vane opening, the wear degree and wear area of the movable guide vane surface gradually decrease. This research is of great significance for the scheduling and operation of hydraulic turbines and the wear protection of movable guide vanes in sediment-laden power station.

Keywords: movable guide vane; facade seal; DPM model; numerical simulation; sediment wear

在高含沙水流的冲击下,黄河流域上的水轮机过流部件遭受到了不同程度磨损破坏^[1-3],万家寨水利枢纽作为黄河中游水电开发的龙头电站,给予晋蒙两省电力供应提供保障,由于万家寨电站在汛期时候允许运行水头较低以及电站担任调峰、调频的任务,电站经常在偏离最优工况下运行,电站的蜗壳、导叶、转轮等过流部件的磨损问题逐渐恶化,其中活动导叶的磨损问题十分突出。在气蚀与泥沙磨损的共同作用下,活动导叶磨蚀严重,一方面活动导叶型线破坏,造成机组发电效率下降,检修周期缩减^[4-5],另一方面活动导叶在全关情况下,漏水量增加,停机时间延长,引起机组制动等问题。因此,非常有必要对小开度下水轮机活动导叶的泥沙磨损进行研究。

含沙水流在水轮机内部是复杂的固液两相流动问题,随着计算机水平的发展,诸多学者采用数值模拟的方法对水轮机过流部件的磨损机理进行研究。刘小兵等^[6]对渔子溪多沙河流电站水轮机的磨损机理进行数值模拟研究,磨损预测结果与实际磨损位置相符,验证了数值模拟的准确性。Rakibuzzaman 等^[7]对混流式水轮机内部的磨损与空化相互作用机理进行了研究,研究发现在气蚀和泥沙磨损共同作用下对水轮机过流面的破坏力更强。河流中泥沙物性影响着水轮机的磨损位置与磨损程度,张广等^[8]充分考虑离散相与连续相之间的作用力,分析了泥沙物性对导叶区压力分布、泥沙浓度分布规律的影响。廖姣等^[9]分析了不同泥沙物性对水轮机转轮磨损特性的影响。对于水轮机间隙流问题,Chen 等^[10]将水轮机端面间隙进行了固液两相流研究,得出间隙流干扰主流区域流动,降低水轮机效率的结论。韩伟等^[11]采用微积分的方法,对活动导叶端面间隙磨蚀形态随时间变化进行了预测。磨损模型的选取对数值模拟的影响较大,苏佳慧等^[12]对几

种常用的磨损模型的适应性进行了对比,最后总结出了各个磨损模型的统一公式。李彦浩等^[13]、庞嘉扬等^[14]和刘凯等^[15]基于欧拉-拉格朗日模型,采用不同的磨损模型对水轮机过流部件的磨损特性进行了研究,发现采用适合的磨损模型可以较好的预测水轮机过流部件的磨损情况。

前人对水轮机泥沙磨损研究集中于泥沙物性与导叶、转轮整体的磨损特性关系研究,对活动导叶立面密封位置的磨损关注较少,本文基于数值模拟方法,采用离散相模型(DPM 模型)和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,研究水轮机小开度工况下导水机构流态变化,并重点分析了小开度工况下活动导叶立面密封位置流态以及活动导叶的磨损特性,预测了活动导叶主要磨损的部位,并与电站活动导叶实际磨损情况进行了对比,该研究对多沙河流水轮机活动导叶磨损防护具有重要意义。

1 数值模拟方法

1.1 计算域模型建立及网格划分

本文研究对象为黄河流域上万家寨型号为 HLFN235-LJ-610 的水轮机,其基本参数如下:额定水头 $H = 68$ m,额定转速 $n = 100$ r/min,额定出力 183.7 MW,活动导叶数量 $Z_1 = 24$,固定导叶数量 $Z_2 = 24$,活动导叶高度 $h = 1\ 747.2$ mm,转轮标称直径 $D_1 = 6\ 100$ mm,转轮叶片个数 $Z_3 = 13$ 个,由水轮机相关图纸资料运行 UG 软件对水轮机的蜗壳、导水机构、转轮、尾水管进行三维建模,其中根据运行工况调节导叶开度建立不同模型(图 1 为 40% 开度工况模型),将建立的模型导入 ICEM 中进行四面体非结构网格划分,为了精确求解导叶区域的流动特性和磨损特性,对该部分进行网格加密处理^[15],并以水轮机效率变化为标准进行网格无关性验证,见表 1,最终确定 40% 开度下网格数约为 578 万个。

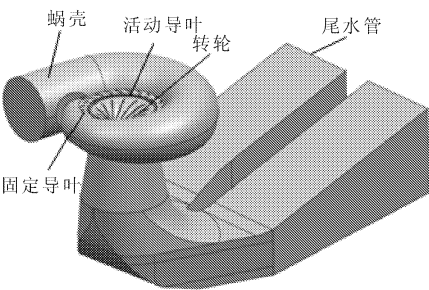


图1 水轮机全流道三维模型

表1 网格无关性分析

方案	网格数/万	模拟效率	实际效率	相对误差/%
方案1	352	0.764	0.87	13.90
方案2	420	0.823	0.87	5.71
方案3	506	0.857	0.87	1.52
方案4	578	0.860	0.87	1.16
方案5	630	0.861	0.87	1.01

1.2 湍流模型

水流在水轮机内部的流动被看作是充分发展的湍流流动,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型经过大多数学者研究可以用于求解水轮机内部的复杂流动,考虑到计算资源以及模型的适用性,本次研究选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, k 和 ε 方程如下^[16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \varepsilon - Y_m + S_k + G_b + G_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \frac{\varepsilon}{k} + S_\varepsilon \tag{2}$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; G_k 表示由平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为由浮力产生的湍流动能; Y_m 为由于过渡的扩散产生耗散率的贡献; S_k 、 S_ε 为自定义的源项;其中 $c_{1\varepsilon} = 1.44$, $c_{2\varepsilon} = 1.92$, $c_{3\varepsilon} = 1.2$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.3 磨损模型

为了能够检测到活动导叶的磨损情况,开启 DPM 模型中的磨损模型,FLUENT 中提供了四种磨损模型,其中 Finnie、McLaury、Oka 模型是根据特定试验条件设置的参数,而 Generic 模型为通用模型,用户可以根据模拟情况自行调节相关参数来反应实际情况,因此本文采用 Generic 模型,其磨损率被定义为:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particle}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \tag{3}$$

式中: $\dot{m}_p$ 为颗粒的质量流量; A_{face} 为壁面面积; $C(d_p)$ 为颗粒离散相的径粒函数; $f(\alpha)$ 为离散相冲击壁面的角度函数; v 为颗粒离散相的速度; $b(v)$ 为离散相的相对速度函数;其中沙粒对所有壁面的碰撞类型都设置为 reflect,冲击角函数采用线性分段的方式定义,速度指数和径粒函数设置为恒定值,相关数值可根据 Lars 等^[17] 对沙粒冲击碳钢试验数据选取。

1.4 计算工况与边界条件

本文主要研究导叶在小开度下导叶叶栅流道的流态变化以及活动导叶的磨损特性,万家寨电站水轮机活动导叶最大开度为 472 mm,分别选取最大开度的 10%、20%、30%、40% 四种开度工况进行模拟计算。首先计算连续相流场,待流场稳定之后加入颗粒离散相,并且开启双向耦合,考虑离散相的重力以及曳力。

(1) 边界条件:进口边界条件选取蜗壳速度进口,大小根据蜗壳进口流量条件得知,尾水管出口采用压力出口;壁面选取无滑移壁面,对于近壁面采用壁面函数处理。

(2) 泥沙条件:万家寨电站处于黄河中游,长期在泥沙含量较高的工况下运行,因此本次模拟基于含沙水条件下进行计算,由万家寨电站测得的水文数据设置,泥沙含量为 13.5 kg/m³,沙粒密度为 2 560 kg/m³,沙粒直径为 0.05 mm,沙粒体积分数为 0.53%。

2 数值模拟结果分析

2.1 活动导叶叶栅流道流态分析

河流中的泥沙颗粒会加快生成空化核,从而促进空化现象的发生,而空化发生时,空泡溃灭所产生的高速射流,使泥沙颗粒携带更高的速度冲击水轮机过流表面,两者联合作用,相互促进,造成机组更为严重的磨蚀破坏,因此对导水机构的压力进行分析。根据电站资料可知,万家寨电站多年平均温度 7.9℃,水在该温度下的气化压力为 1.1 kPa,图 2 为不同导叶开度下活动导叶区间的压强云图,四种开度下活动导叶区域的压强分布呈现一定的规律性,固定导叶区域的压强保持在一个数量级,由固定导叶至活动导叶出口,压强逐渐降低,在背水面接近立面密封位置处形成一部分低压区,因此在该部位容易发生泥沙磨蚀,在活动导叶叶栅流道区域内,随着

导叶开度的降低,导叶区域的最大压强增加,最小压强减小,一方面增加了导叶区的水压荷载力,另一方面较低的压力会引起空化发生。

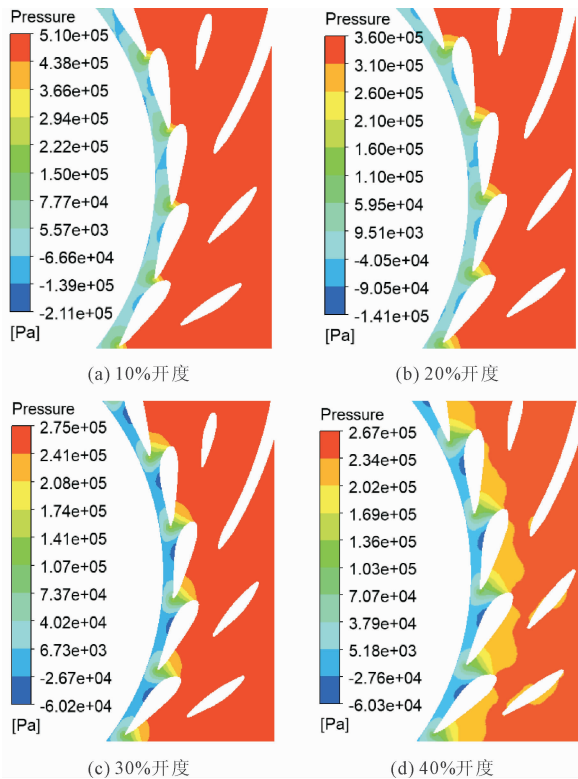


图 2 对称面活动导叶局部压强图

经研究表明,水轮机的磨损强度 $I = 0.4532 \times 10^{-7} PEV^Z$,其中 Z 为速度的修正指数,根据经验取 $2 \sim 3$,由此可以看出水轮机磨损强度与水流速度的 $2 \sim 3$ 次方成正比,而导叶开度对叶栅流道内的速度变化较大,因此对叶栅流道内的流速变化进行分析。图 3 为导叶区对称截面流线图,由图可以看出不同开度下水流的速度变化比较一致,含沙水流从蜗壳进口至活动导叶出口,沿径向方向速度逐渐增加,在活动导叶出口位置速度达到最大。在 30% 开度和 40% 开度工况下,水流流速变化较为稳定,由蜗壳至导水机构区域过渡顺滑;而在小开度的工况下,水流在经过活动导叶立面间隙时,流速急剧增加,在活动导叶出口位置流速突然增加到 30 m/s 左右,在 10% 开度工况下尤其突出,活动导叶出口最大流速达到 32 m/s ,在水轮机极小开度工况下运行,活动导叶出口流速以周向速度为主,导叶出口至转轮进口的流程增长,从而增加了水流能量的沿程损失,由图 3(a) 可知,10% 开度下活动导叶头部的撞击脱流比较严重,且活动导叶出口整个圆周环量速度分布不均匀,会造成转轮室受到不稳定的水流作用力。

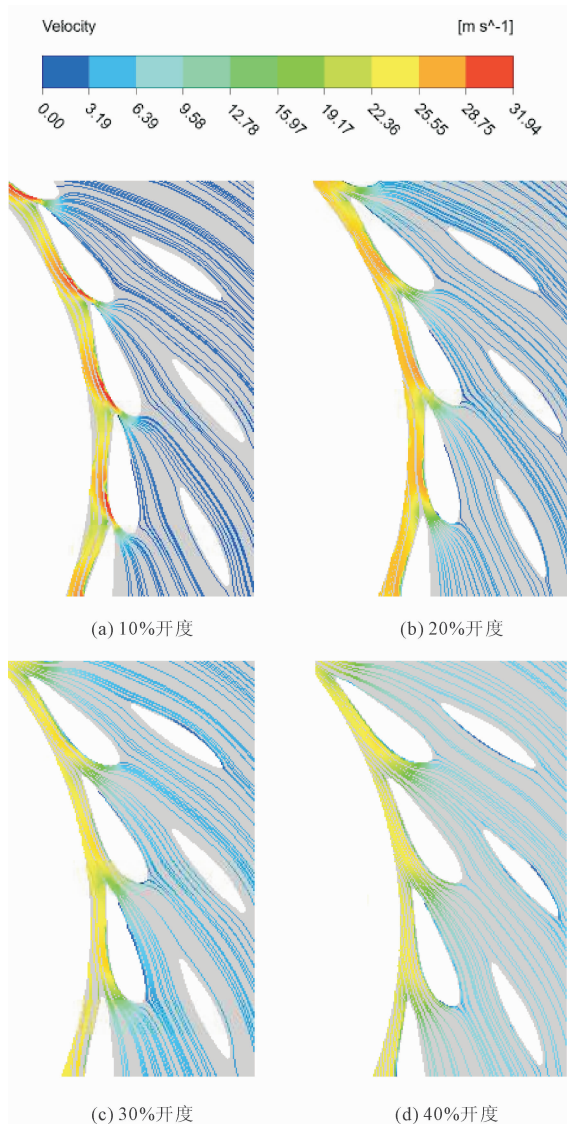


图 3 导叶区对称截面流线图

2.2 活动导叶立面密封流态分析

水轮机组停机时,活动导叶开度为 0,活动导叶之间靠大头啮合区和小头止漏面之间研合密封止水,图 4 为活动导叶立面密封的安装位置示意图,在活动导叶大头区域安装密封条,由于电站长期偏离最优工况运行,在检修期发现活动导叶立面密封位置磨损严重,造成机组停机时漏水量增加,影响机组安全运行,因此重点关注活动导叶立面密封位置处流态。

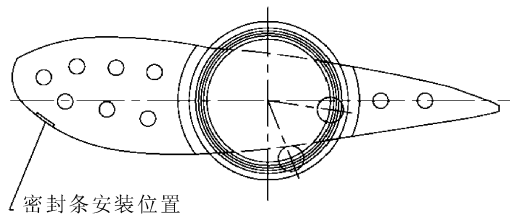


图 4 密封条安装位置示意图

图 5 是不同开度下活动导叶立面密封位置两侧压力差曲线,由曲线可以看出随着导叶开度的减小,活动导叶立面密封处两侧的压力差逐渐增加,导叶 40% 开度减小到 10% 开度,压力差由 48 kPa 增加到 108 kPa,由此可以看出,在小开度工况下,压力差过大造成立面密封位置两侧压力变化不均匀,导叶立面密封两侧交替的水压力会使密封条处产生向外的拉力,从而造成密封条脱落,在一定的压力条件下,易发生空化,进一步在含沙水流的冲击下引起密封条磨损。

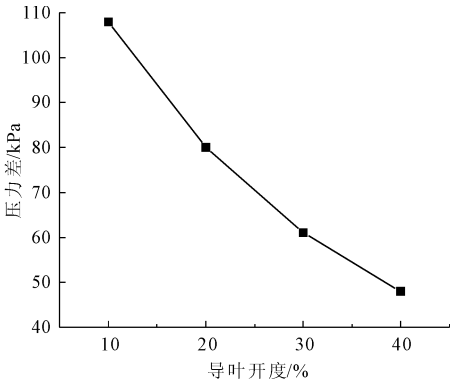


图 5 不同开度下 $Z=0$ 截面密封条位置压力差

速度越高,泥沙颗粒所携带的动能越大,对活动导叶造成的磨损更严重,因此对活动导叶近壁面的流速特性进行分析。提取活动导叶背水面近壁区域的流线如图 6 所示,该流线能够反映出活动导叶近壁面的流速特性,在流线上提取出密封位置处流速以及沿活动导叶弦长等比例取样点的流速。图 7 为不同叶高截面立面密封位置的流速变化曲线,导叶靠近低环的面为 0 截面,由图 7 可以看出在导叶立面密封位置的流速沿叶高截面方向变化平缓,在导叶底部以及顶部速度最小,在接近活动导叶中部时,速度有平缓的上升趋势,因为水流与座环之间的阻力减小,造成水流速度增加。

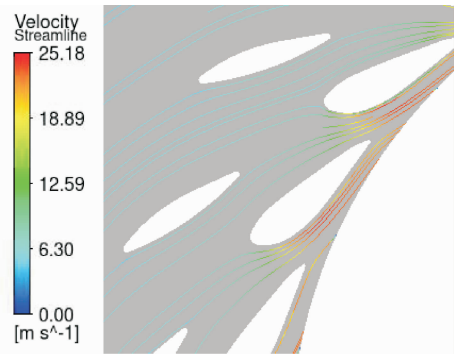


图 6 活动导叶区域流线图

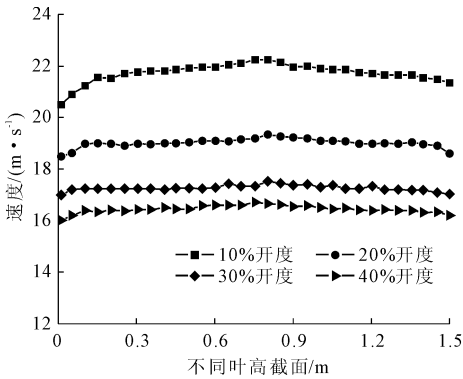


图 7 不同叶高截面活动导叶密封处流速

图 8 为不同开度下对称面活动导叶背水面近壁面流速变化曲线,其中横坐标表示沿活动导叶背水面流线等比例取样的点,导叶进口表示为 0,导叶出口表示为 1,由图 8 可以看出在导叶背水面一侧,流速从活动导叶头部逐渐增大,在 30% ~ 40% 弦长位置处,速度达到最大,随后沿弦长部分平稳减小,这种不稳定的变速运动会加快活动导叶背面的磨损。由图 6 和图 7 可知,在 10% 开度工况下,活动导叶立面密封位置处最大流速达到了 24 m/s,背水面最大流速达到 32 m/s,均高于其他工况,由此可见,小开度工况下,含沙水流在背水面的冲击力更强,因此磨损也更为严重。

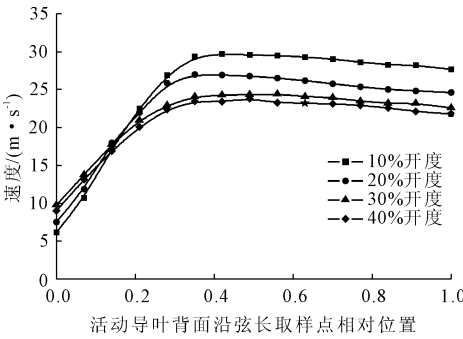


图 8 不同开度下活动导叶背面沿弦长流速

2.3 活动导叶磨损特性分析

不同导叶开度下活动导叶表面平均磨损率如表 2 所示,可以看出导叶开度由 10% 增加至 40%,活动导叶表面的平均磨损率逐渐减小,10%、20% 开度工况比 30%、40% 开度工况下最大磨损率高出一个数量级,由于随着导叶开度的增大,叶栅流道的流态逐渐稳定,导叶泥沙颗粒在流道内的撞击较小,从而减小了磨损率。

为了更加清晰了解活动导叶的磨损位置与磨损程度,对四种活动导叶开度下活动导叶表面磨损率

分布云图进行分析,图 9 为四种开度下活动导叶迎水面与背水面的磨损率分布云图。

开度/%	10	20	30	40
平均磨损率 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.70×10^{-3}	5.70×10^{-3}	1.13×10^{-4}	2.27×10^{-5}

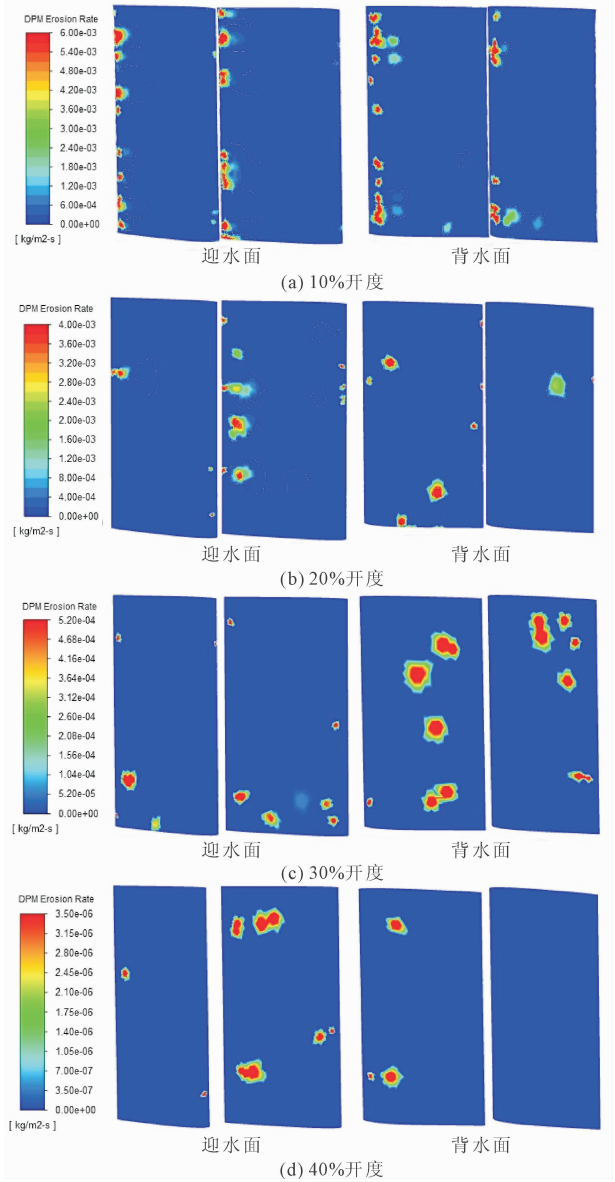


图 9 活动导叶表面磨损云图

由图 9 可知,在 10% 开度、20% 开度下,活动导叶迎水面的出水边和头部区域以及背水面头部立面密封位置处磨损严重,造成这种现象是因为在小开度工况下运行,蜗壳与固定导叶流道的流速变化较为均匀,而水流在经过活动导叶较小的立面缝隙时,水流速度突然增大,此时可能造成射流磨损的条件,从而造成活动导叶出水边以及背面头部立面密封位

置磨损。此外由于泥沙颗粒所受合力作用偏下,从而造成活动导叶对称面以下部分磨损更为严重。在 30% 开度下,活动导叶表面的磨损位置逐渐变得不均匀,在迎水面磨损位置主要分布在靠近底部位置,背水面的磨损相对于 10% 开度、20% 开度磨损区域变大,且主要分布在导叶中部区域,因为导叶开度的增大,泥沙随流性较好,背水面的流速较大,造成背水面的磨损区域变大,当导叶开度增加至 40% 时,活动导叶迎水面和背水面的磨损区域都变小,由于叶栅流道变宽,水流更加顺畅,磨损主要分布在头部以及尾部区域。

图 10 为万家寨电站活动导叶实际磨损与数值模拟对比图,由图可以看出在活动导叶的大头立面密封位置磨损较为严重,出现不均匀的波纹状磨损,活动导叶小头出水边出现锯齿状磨损,与 10% 开度下模拟的磨损位置较为一致,验证了数值模拟方法的准确性。

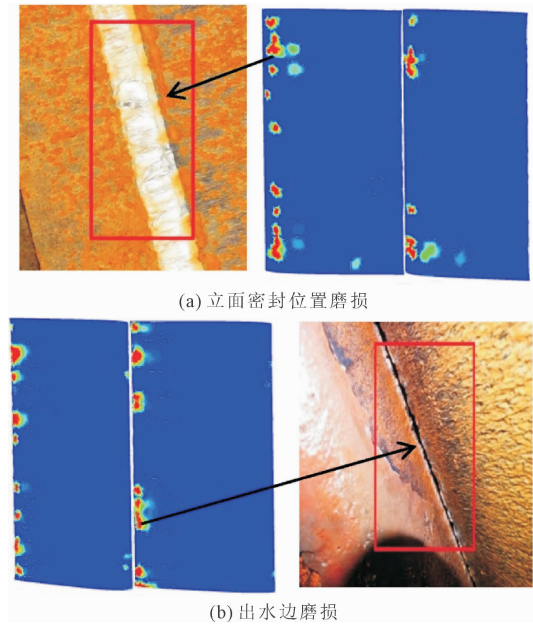


图 10 电站活动导叶实际磨损与数值模拟对比

3 结 论

- (1) 含沙水流在活动导叶出口处压能大部分转换成动能,因此在活动导叶出口处速度达到最大值,压强达到最小值。小开度下,导叶叶栅流道内变化梯度较大,速度与压强都迅速变化,水流流态紊乱。
- (2) 对比四种开度工况,活动导叶立面密封位置两侧压力差随着导叶开度的减小反而增大,10% 开度工况下,立面密封位置压差大,过渡不顺滑,在一定压力条件下,容易发生空化;活动导叶立面密封

位置流速沿叶高方向梯度变化几乎为0,变化平缓,在活动导叶背面沿弦长速度整体呈现先增大后减小的趋势,在弦长30%~40%位置速度达到最大,随后平缓下降,这种不均匀的速度变化会加速导叶背面的磨损。

(3) 活动导叶表面平均磨损率随着导叶开度的增加而减小,活动导叶在10%开度时,迎水面的出水边和头部区域及背水面头部立面密封位置磨损严重,由于泥沙颗粒的沉降作用,活动导叶对称面以下区域磨损更为严重,40%开度下,活动导叶表面磨损程度与磨损范围减少。因此,电站运行应该避免小开度工况运行以及注重活动导叶头部、立面密封处的磨损防护。

参考文献:

- [1] 方兴,余志顺,刘小兵.高水头多泥沙电站水轮机导叶的泥沙磨损研究[J].人民黄河,2019,41(6):121-124.
- [2] 徐存东,南瑞芳,魏怀东.大型双吸离心泵流场数值模拟及汽蚀修复[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):199-203.
- [3] Qian B, Zhang L, Ma Y, et al. Research on abrasion protection technology of hydroturbine components in Gongzui Hydropower Station[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020,453:12063.
- [4] 陆力,刘娟,易艳林,等.白鹤滩电站水轮机泥沙磨损评估研究[J].水力发电学报,2016,35(2):67-74.
- [5] 李贵勋,张雷,郑军,等.刚柔并济应对复杂环境下水轮机导水机构磨蚀破坏[J].水电站机电技术,2020,43(4):5-7.
- [6] 刘小兵,曾永忠,华红,等.渔子溪电站水轮机转轮叶片泥沙磨损研究[J].西华大学学报(自然科学版),2020,39(5):67-73.
- [7] Rakibuzzaman M, Kim H, Kim K, et al. Numerical study of sediment erosion analysis in francis turbine[J]. Sustainability, 2019,11(5):1423.
- [8] 张广,魏显著,刘万江.水轮机导叶区固液两相流动数值研究[J].大电机技术,2015(2):42-45.
- [9] 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,2017,36(5):88-94.
- [10] Chen Y, Li R, Han W, et al. Sediment erosion characteristics and mechanism on guide vane end-clearance of hydro turbine[J]. Applied Sciences-Basel, 2019,9(19):4137.
- [11] 韩伟,陈雨,刘宜,等.水轮机活动导叶端面间隙磨蚀形态演变预测[J].农业工程学报,2018,34(4):100-107.
- [12] 苏佳慧,郭志伟.基于磨损公式的磨损模型适用性研

究[J].中国农村水利水电,2019(4):104-109.

- [13] 李彦浩,郭豹,肖业祥.高水头混流式水轮机转轮泥沙磨损特性模拟研究[J].水力发电学报,2020,39(2):112-120.
- [14] 庞嘉扬,张惠忠,杨建明,等.高水头混流式水轮机沙水流动数值模拟及转轮泥沙磨损实验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2020,35(4):436-443.
- [15] 刘凯,桂林,胡彬.混流式水轮机导水机构内水流流态数值模拟[J].西南民族大学学报(自然科学版),2012,38(5):831-837.
- [16] 赵相航,解宏伟,郭馨,等.基于VOF模型的台阶式溢洪道数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):143-148.
- [17] Lars N, Terje S. Erosion of oil & gas industry choke valves using computational fluid dynamics and experiment[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1998,19(6):636-643.

特邀作者简介

张雷,1982年9月生人,博士,正高级工程师,河海大学、郑州大学、西安理工大学、河南工业大学、华水水利水电大学等高校校外合作硕士生导师,中共党员,现任黄河水利委员会黄河流域生态保护和高质量发展研究中心“水工程磨蚀防护技术创新团队”负责人,黄河水利科学研究院工程力学研究所工程加固与防腐抗磨研究室副主任(主持工作),河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心副主任(主持工作)。长期从事水利水电工程的水力机械和电气设备检测与评价,水工建筑物和水力机械磨蚀修复与除险加固技术,以及水工程智能远程运维与监管技术等研究和应用。主持国家自然科学基金3项、水利部技术示范项目2项、科研院所基本科研业务费项目3项、黄科院推转基金1项,主持完成“刘家峡、三门峡、万家寨、小浪底、大渡河、新疆达克曲克水电站和台湾石门水库、新疆五一水库以及珠江三角洲水资源配置、兴安盟供水工程、固海扬水工程”技术推广项目50余项。发表论文80余篇,其中SCI/EI收录40余篇,出版专著、译著4部,获发明/实用新型专利20余项,获省部科技进步一等奖2项、二等奖3项、三等奖2项,水利部先进实用技术推广证书3项,黄河水利委员会科技进步一等奖1项,南京水利科学研究院科技进步一等奖2项。获“水利部水利青年拔尖人才”、“河南省水利行业个人突出贡献奖”、“黄科院青年科技英才”等学术荣誉称号。