doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.043

基于 DEM－CFD 的混流式水轮机粗沙水流条件泥沙磨损机制研究

黄剑峰[1,2]　姚　激[3]　张蕾蕾[1,2]

（1.北部湾大学建筑工程学院，钦州 535011；2.广西海洋工程装备与技术重点实验室，钦州 535011；
3.昆明理工大学建筑工程学院，昆明 650500）

摘要：含沙水流条件下水轮机内部泥沙颗粒与湍流两相介质相互作用对水轮机壁面冲蚀磨损机制有重要影响。基于 GPU 加速耦合颗粒离散元与计算流体力学方法求解混流式水轮机内部颗粒-流体系统。通过泥沙颗粒真实外形建模，DEM－CFD 耦合模拟获得水轮机泥沙颗粒流磨损特性。结果表明：GPU 加速可节省计算成本，粗沙水流下泥沙颗粒受水流影响在尾水管内小开度工况以“短螺旋”方式运动，而大开度工况则以“长螺旋”方式运动；小开度工况球形多面体泥沙颗粒曳力最大值比球体颗粒大 34.78%。大开度工况颗粒对活动导叶的碰撞强度比固定导叶大 74.13%，说明其冲击磨损强于固定导叶；粒子对固定导叶的滑动距离平均最大值比活动导叶大 21.43%，说明其剪切磨损强于活动导叶。活动导叶、转轮叶片和尾水管壁面磨损情况与文献试验结果及电站实际磨损一致；在汛期控制水轮机在小开度工况运行是有利的。研究结果可为改善水轮机泥沙磨损破坏提供理论参考。

关键词：混流式水轮机；粗沙水流；DEM－CFD；泥沙磨损；数值模拟

中图分类号：TV734；TV136^{+}.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0468-09　　**OSID**：

Sediment Erosion Mechanism of Francis Hydro-turbine under Coarse Sand Water Flow Conditions Based on DEM－CFD

HUANG Jianfeng[1,2]　YAO Ji[3]　ZHANG Leilei[1,2]

(1. *College of Civil Engineering and Architectural*, *Beibu Gulf University*, *Qinzhou* 535011, *China*
2. *Guangxi Key Laboratory of Ocean Engineering Equipment and Technology*, *Qinzhou* 535011, *China*
3. *Faculty of Civil Engineering and Mechanics*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: The interaction between sediment particles and turbulent two-phase media inside hydro-turbine under sand containing water flow conditions has a significant impact on the erosion and wear mechanism of the turbine wall. Based on GPU accelerated coupled particle discrete element (DEM) and computational fluid dynamics (CFD) methods to solve the internal particle fluid system of hydro-turbine, the wear characteristics of sediment particle flow in hydro-turbine through DEM－CFD coupling simulation were obtained by using the real shape modeling of sediment particles. The results showed that GPU acceleration can save computational costs. Sediment particles under coarse sand flow were affected by the water flow and moved in a “short spiral” manner in the draft tube at small opening case, while at big opening case, they moved in a “long spiral” manner. The maximum resistance of spherical polyhedral sediment particles at small opening case was 34.78% higher than that of spherical particles. The collision strength of particles on the guide vanes at big opening case was 74.13% higher than that of the stay vanes, indicating that their impact wear was stronger than that of the stay vanes. The average maximum sliding distance of particles on the stay vanes was 21.43% higher than that of the guide vanes, indicating that their shear wear was stronger than that of the guide vanes. The wear of the guide vanes, runner blades and draft tube walls was consistent with the experimental results in the literature and the actual wear of the power plant. It was beneficial to control the operating case of the hydro-turbine during the flood season and operate it at small opening case. The research result can provide theoretical reference for improving the sediment erosion and damage of hydro-turbine.

Key words: Francis hydro-turbine; coarse sand water flow; DEM－CFD; sediment wear; numerical simulation

收稿日期：2024－04－11　修回日期：2024－06－24

基金项目：国家自然科学基金项目(52169020)和北部湾大学引进高层次人才科研启动项目(2022KYQD01)

作者简介：黄剑峰(1978—)，男，教授，博士，主要从事水力机械内部流动数值模拟研究，E-mail：hjf30@126.com

0　引言

运行在含沙水流中的水轮机会面临泥沙磨损问题，其一直制约着水力发电机组的高效稳定运行，同时也影响了当前我国“双碳”背景下构建以清洁低碳能源为主体的能源供应体系建设新型电力系统实现碳中和的目标[1]。长期的泥沙磨损最终会导致水轮机过流部件表面的材料流失以及机组效率与运行稳定性下降[2]。颗粒与颗粒、颗粒与流体以及颗粒与壁面的相互作用增加了水轮机冲蚀磨损行为的复杂性。随水流动的泥沙会冲蚀水轮机过流部件的材料表面，尤其是石英和长石等硬度较高的泥沙，可能导致流动模式的改变。水轮机的泥沙磨蚀问题涉及多个学科，目前主要通过试验方法和数值模拟对水轮机泥沙磨损有关问题进行研究[3]。文献[4－5]针对混流式水轮机、冲击式水轮机开展 DPM (Discrete phase model)数值模拟研究，并与实际磨损情况进行对比分析，发现冲蚀效果与泥沙颗粒大小形状有关。文献[6－8]对混流式水轮机泥沙磨损易损部位、磨蚀严重程度等进行总结并提出应对措施。文献[9－10]对高水头水电站混流式水轮机泥沙磨损进行了试验研究与数值模拟计算，获得了固定导叶、活动导叶与转轮的泥沙磨损规律，拟合出泥沙磨损率计算公式。文献[11－12]主要针对离心泵及泵站系统开展水沙两相流数值模拟，研究了泥沙浓度和泥沙粒径对泵内磨损及泵站进水系统的影响规律。

近年来随着计算多相流体动力学的发展，应用欧拉–拉格朗日方法对固液两相颗粒流的研究逐渐增多，代表性的如 ANSYS Fluent 中的离散相 DPM 模型，以及颗粒离散元与计算流体动力学耦合的 DEM－CFD 耦合方法等。文献[13－14]基于 DPM 模型对混流式水轮机及活动导叶的泥沙磨损特性进行了预测，发现与真实磨损情况较为吻合。文献[15]采用 DPM 模型结合模型试验分析了双吸式离心泵叶片出口的磨损破坏规律及其形成机制。但 DPM 模型中不能真实考虑不规则颗粒形状，所以并未真正反映颗粒对壁面的冲蚀磨损特性，而 DEM－CFD 耦合方法能模拟真实颗粒形状特别是非规则颗粒，能够体现真实颗粒对壁面的冲击磨损。国内有学者将 DEM－CFD 耦合方法引入旋流泵[16]、混流泵[17－18]、离心泵[19]的固液两相流数值模拟中，研究不同粒径、体积分数球形颗粒的泥沙磨损特性，并与试验进行对比。文献[20]采用 DEM－CFD 方法建立压裂工况下的缩径管两相流模型并通过试验验证模型的准确性，分析了缩径管的冲蚀特性。文献[21－22]利用 CFD－DEM 方法模拟冲击式水轮机的水沙两相流，研究结果为其泥沙磨损的防护提供参考。由此可见，DEM－CFD 耦合方法已在管道冲蚀、冲击式水轮机及水泵泥沙磨损问题方面进行应用，而应用到混流式水轮机泥沙磨损方面的相关文献鲜见。

为探究粗沙水流条件下混流式水轮机内泥沙颗粒动力学特性对过流部件壁面冲击磨损的影响机理，本文应用离散元与计算流体动力学耦合的 DEM－CFD方法，采用有限体积法求解连续介质流体质量、动量守恒方程，离散单元法求解固相颗粒流动控制方程，固相与流体的相间耦合作用通过相间动量项完成，基于 GPU 加速实现连续相 CFD 模拟与泥沙颗粒离散相 DEM 的单向耦合计算，通过引入 Oka 磨损模型，对粗沙水流下混流式水轮机全流道的冲蚀磨损规律进行研究，以期为改善水轮机固液多相流泥沙磨损破坏提供参考。

1　研究对象和数值模型

1.1　DEM－CFD 耦合控制方程

离散单元法(DEM)是一种预测颗粒介质动力学特性的数值模拟方法，其可以与 CFD 耦合仿真颗粒流系统。在离散元框架中，所有颗粒在计算域中都以拉格朗日方式追踪，通过求解欧拉第一及第二定律分别控制颗粒的平移与旋转，公式为

$$m_p \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_p}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F}_c + \boldsymbol{F}_{f\to p} + m_p\boldsymbol{g} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{J}_p \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_p}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{M}_c + \boldsymbol{M}_{f\to p} \tag{2}$$

式中　m_p——颗粒质量，kg

$\boldsymbol{v}_p$——颗粒速度，m/s

$\boldsymbol{F}_c$——颗粒与颗粒和颗粒与壁面相互作用的接触力，N

$\boldsymbol{F}_{f\to p}$——颗粒与流体相相互作用引起的附加力，N

$\boldsymbol{g}$——重力加速度，取 9.81 m/s^2

$\boldsymbol{J}_p$——转动惯量，kg·m^2

$\boldsymbol{\omega}_p$——角速度，rad/s

$\boldsymbol{M}_c$——引起颗粒转动的切向力产生的净力矩，N·m

$\boldsymbol{M}_{f\to p}$——流体速度梯度引起的附加力矩，N·m

可以看出，由于颗粒与流体的相互作用，与纯 DEM 模拟相比，上面方程中增加了 $\boldsymbol{F}_{f\to p}$与 $\boldsymbol{M}_{f\to p}$。

泥沙颗粒之间及颗粒与壁面之间的接触力 $\boldsymbol{F}_c$ 由法向力 $\boldsymbol{F}_n$(垂直于接触面的力)与切向力 $\boldsymbol{F}_\tau$(与接触面相切的力)两部分组成。本次计算中法向力

采用滞后线性弹簧模型,切向力采用线性弹簧库仑极限模型,滚动阻力采用 C 型线性弹簧滚动极限模型[23]。

根据流动条件,在流体与颗粒之间密度相差较大的情况下,流体相互作用力 $\boldsymbol{F}_{f\to p}$ 通常可以忽略附加虚拟质量力、升力等,只考虑曳力与压力梯度力,计算公式为

$$\boldsymbol{F}_{f\to p}=\boldsymbol{F}_D+\boldsymbol{F}_{\nabla p} \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{F}_D=\frac{1}{2}C_D\rho_f A'|\boldsymbol{u}-\boldsymbol{v}_p|(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{v}_p) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}_{\nabla p}=-V_p\nabla p \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{F}_D$——曳力,N

C_D——曳力系数

ρ_f——流体密度,kg/m^3

A'——颗粒在流动方向的投影面积,m^2

$\boldsymbol{u}$——流体速度,m/s

$\boldsymbol{u}-\boldsymbol{v}_p$——颗粒与流体之间的相对速度,m/s

$\boldsymbol{F}_{\nabla p}$——压力梯度力,N

V_p——颗粒体积,m^3

∇p——局部压力梯度,Pa/m

流体速度梯度引起的附加力矩计算公式为

$$\boldsymbol{M}_{f\to p}=C_T\frac{1}{2}\rho_f\frac{d_p^5}{2^5}|\boldsymbol{\omega}_r|\boldsymbol{\omega}_r \tag{6}$$

式中 C_T——转矩系数

d_p——颗粒直径,mm

$\boldsymbol{\omega}_r$——相对流体-颗粒角速度,rad/s

1.2 泥沙颗粒离散元建模

泥沙颗粒真实外形分别采用三维球体与球形多面体,如图 1 所示。其中球形多面体形状参数取值如下:垂直纵横比 1.5,水平纵横比 0.75,平滑度 0.25,尖角数 15,超二次曲面 2.00。泥沙从蜗壳进口处随流体一起注入水轮机全流道,粗沙粒径分布(PSD)为:1 ~ 2 mm 占 20%;0.5 ~ 1 mm 占 60%;0 ~ 0.5 mm 占 20%。球体颗粒粒径按筛分粒径方式设置,球形多面体颗粒粒径按等容粒径方式设置,两种粒径设置方式原理如图 2 所示。考虑到水轮机实际运行情况,以小开度工况、设计工况与大开度工况 3 种典型工况开展颗粒-流体耦合计算。3 种工况下泥沙颗粒质量流率均取 0.01 kg/s,对应水流含沙量(泥沙质量浓度)为 0.30 kg/m^3(颗粒质量分数 1%),考虑到固液两相之间存在滑移速度,蜗壳进口处泥沙颗粒入射速度取值如下:小开度工况 2.59 m/s,设计工况 4.43 m/s,大开度工况6.61 m/s。

颗粒曳力系数采用 Haider - Levenspiel 模型[24],该模型曳力系数计算公式为

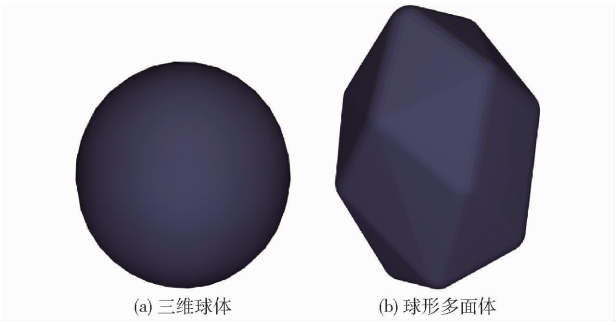

图 1 三维泥沙颗粒模型

Fig. 1 3D sediment particle model

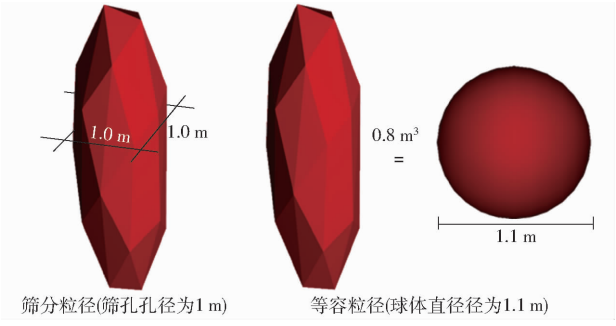

图 2 粒径设置方式

Fig. 2 Particle size setting method

$$C_D=\frac{24}{Re_p}(1+ARe_p^B)+\frac{C}{1+\frac{D}{Re_p}} \tag{7}$$

式中 Re_p——颗粒雷诺数

对于球体颗粒:$A=0.180\,6$,$B=0.645\,9$,$C=0.425\,1$,$D=6\,880.95$;对于非球体颗粒:$A=\exp(2.328\,8-6.458\,1\phi+2.448\,6\phi^2)$,$B=0.096\,4+0.556\,5\phi$,$C=\exp(4.905-13.894\,4\phi+18.422\,2\phi^2-10.259\,9\phi^3)$,$D=\exp(1.468\,1+12.258\,4\phi-20.732\,2\phi^2+15.885\,5\phi^3)$;$\phi$ 为颗粒球形度,定义为 $\phi=A_{sph}/A_p$,A_{sph} 为与颗粒具有相同体积球体的表面积,A_p 为颗粒的实际表面积。

对湍流导致的颗粒扩散采用离散随机游走模型模拟。该模型可以随机预测流体相中湍流引起的颗粒扩散,湍流在每个粒子的轨迹期间随机采样,并允许影响其运动。

1.3 混流式水轮机模型和边界条件

混流式水轮机型号为 HL100 - WJ - 75,其机组实物如图 3 所示。该水轮机设计水头 170 m,额定转速 1 000 r/min,额定流量 1.8 m^3/s,转轮叶片数 17。由于水轮机过流部件内部几何结构复杂,为了提高数值分析精度,从蜗壳进口到尾水管出口的整个全流道计算网格采用非结构四面体网格划分,采用水轮机效率指标,以网格数目 1.68×10^6、2.09×10^6、2.54×10^6 对设计工况网格进行无关性验证,效率分别为 92.1%、94.5%、94.8%,权衡计算代

价与精度，最终采用网格单元数为 2.09×10^6 的网格进行计算，整体网格划分如图 4 所示。水轮机内水流连续相流场数值模拟基于 ANSYS Fluent 双精度平台，采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型[25]进行稳态连续性方程与 N－S 方程计算，动静区域采用多参考系 MRF 模型处理，压力速度耦合采用 SIMPLE 算法，各通量采用二阶迎风格式。流体相采用速度进口和自由出流边界条件，在壁面处采用无滑移边界条件。



图 3　原型混流式水轮机

Fig. 3　Prototype hydro-turbine

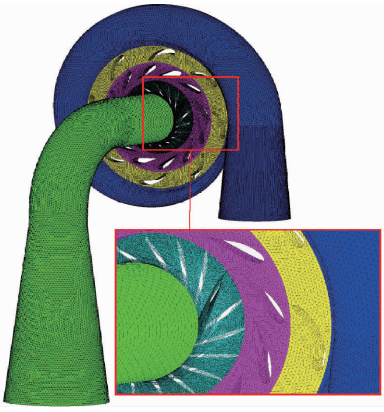

图 4　混流式水轮机全流道网格

Fig. 4　Grids of Francis hydro-turbine

水轮机壁面材料设置为不锈钢，密度为 7 850 kg/m^3，弹性模量为 2×10^{11} Pa，泊松比为 0.3。泥沙颗粒密度为 2 650 kg/m^3，弹性模量为 1×10^8 Pa，泊松比为 0.3。颗粒之间及颗粒与不锈钢之间的接触采用软球模型，材料之间的接触参数见表 1。

表 1　材料接触参数

Tab. 1　Material contact parameters

材料	静摩擦因数	动摩擦因数	材料恢复系数
颗粒–颗粒	0.27	0.01	0.44
颗粒–不锈钢	0.15	0.01	0.50

常用的壁面磨损模型有 Finnie、Oka、McLaury、DNV 等。文献[26－27]通过对 90°弯管的磨损预测发现 Oka 模型预测结果与试验结果最为接近，因此本文磨损模型采用 Oka 模型。Oka 模型[28]公式为

$$E=E_{90}\left(\frac{V}{V_{\mathrm{ref}}}\right)^{k_2}\left(\frac{d}{d_{\mathrm{ref}}}\right)^{k_3}f(\gamma) \tag{8}$$

其中　$$f(\gamma)=\sin^{n_1}\gamma[1+H_v(1-\sin\gamma)]^{n_2} \tag{9}$$

式中　E——磨损率，kg/(m^2·s)

E_{90}——在 90° 撞击角时的参考磨损率，kg/(m^2·s)

V——颗粒撞击速度，m/s

V_{ref}——参考速度，取 104 m/s

d——颗粒直径，mm

d_{ref}——颗粒参考直径，取 0.326 mm

k_2——速度指数，取 2.35

k_3——直径指数，取 0.19

$f(\gamma)$——撞击角函数

H_v——壁面材料维氏硬度，取 1.83 GPa

n_1、n_2——角函数常数，取 0.77、1.36

1.4　基于 GPU 加速的 DEM－CFD 耦合模拟

在 DEM－CFD 耦合模拟中，只考虑流体流动对颗粒运动的影响，不考虑颗粒运动对流体流动的影响，将 Fluent 流场模拟的不同工况结果输出为 F2R 文件，通过 Rocky DEM 求解器中 CFD 耦合接口导入实现 DEM－CFD 耦合计算。在耦合计算中开启边界碰撞统计、CFD 耦合粒子统计、组间碰撞统计与粒子间碰撞统计模块，收集边界强度、粒子阻力、颗粒碰撞等数据。为了达到颗粒与流体计算同步，在 DEM 中转轮部件也设置为与流体计算中相同的转速，颗粒–流体耦合计算的物理过程时间设为 2 s（每 0.05 s 记录一次数据）。利用 GPU 加速功能提高计算效率，在内存 64 GB 戴尔工作站上通过比较模拟完成一组工况，选择单 GPU（NVIDA Quadro P5000 16 GB 显存）耗时约 17 h，而选择 8 核 CPU（Intel Xeon Gold 6130）耗时约 40 h，单 GPU 相比 8 核 CPU 节省耗时 57.5%。

2　DEM－CFD 数值模拟方法验证

由于开展原型混流式水轮机磨损试验成本高，采用 DEM－CFD 耦合计算方法数值模拟在相同几何物理条件下的标准 90°弯管磨损试验[29]，并进行了比较。图 5 为 90°弯管计算模型及流体域网格划分，基于 ANSYS Meshing 采用六面体网格划分共计 348 500 个单元。其中 CFD 流场计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，DEM 磨损计算采用球体颗粒及 Oka 模型。

为了验证 DEM－CFD 耦合方法的可靠性，将本文数值模拟结果与文献[29]试验结果进行对比分析。图 6 为弯管不同角度磨损深度，可以看出本文数值模拟结果与试验结果分布变化趋势较为一致，磨损深度最大值与试验结果较为吻合。图 7 为弯管

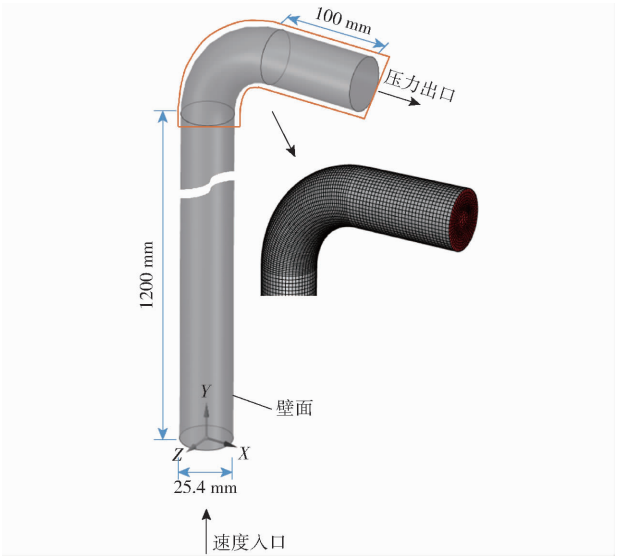

图 5 弯管模型及网格划分

Fig. 5 Elbow model and mesh generation

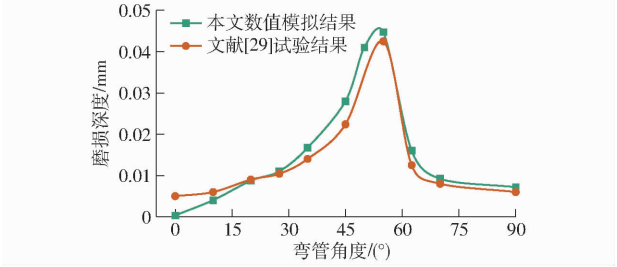

图 6 弯管不同角度磨损深度

Fig. 6 Erosion depth of elbow at different angles

冲蚀磨损分布,文献[29]中试验观察到的最大磨损位置在弯管 55°位置处,本文数值模拟预测到的最大磨损位置在弯管 53°位置左右,与试验结果较为接近。由此可知,采用的 DEM - CFD 耦合方法及磨损模型是合理、准确、可靠的,可用于混流式水轮机固液多相流的进一步分析。

3 结果分析

3.1 水轮机内泥沙颗粒运动规律分析

水轮机主流道内不同工况泥沙颗粒运动速度分布图如图 8 所示。可以看出,泥沙颗粒受到 3 种工况水轮机内水流流速影响,大开度工况的泥沙颗粒速度高于设计工况与小开度工况。在转轮内由于叶轮高速旋转带动泥沙颗粒速度均达到最大值,总体来看受水流携带的泥沙颗粒较为稠密均匀地分布在整个蜗壳流道内。受不同工况导叶开度作用,进入导水机构内泥沙颗粒数量明显减少,小开度工况由于活动导叶流道变窄泥沙颗粒集中在转轮进口周边,碰撞较为激烈且速度较大。设计工况与大开度工况由于受重力及旋转离心力作用泥沙颗粒都聚集在临近蜗壳鼻端位置的几个转轮叶道进口周围,而其它叶道进口颗粒随流性变差分布较为零散。叶轮流道内多数速度较大的泥沙颗粒都撞击到叶片工作面,通过转轮后颗粒被甩入尾水管,设计工况的泥沙颗粒在整个管段内随水流运动较为平滑顺直,而小开度工况的泥沙颗粒在弯管段内发生较为明显的“短螺旋”运动,大开度工况的泥沙颗粒则在弯管段与直锥管段内出现“长螺旋”运动。图 9 为不同工况泥沙颗粒受到流体施加的平均曳力最大值随时间变化情况,可以看出随时间推移泥沙颗粒曳力最大值均出现不规则波动变化,泥沙颗粒为球体时小开度工况曳力最大值约 0.03 N,而设计工况与大开度

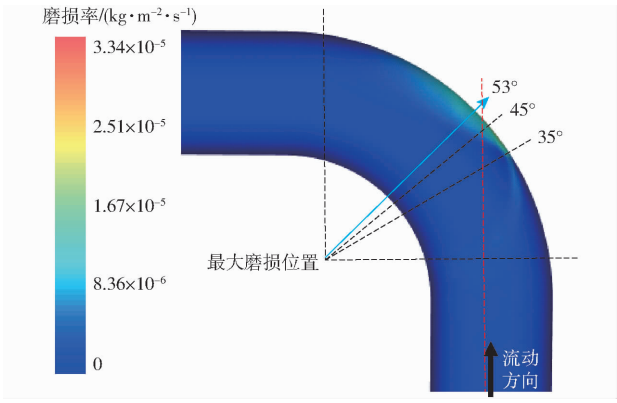

图 7 弯管冲蚀磨损分布

Fig. 7 Erosion wear distribution of elbow

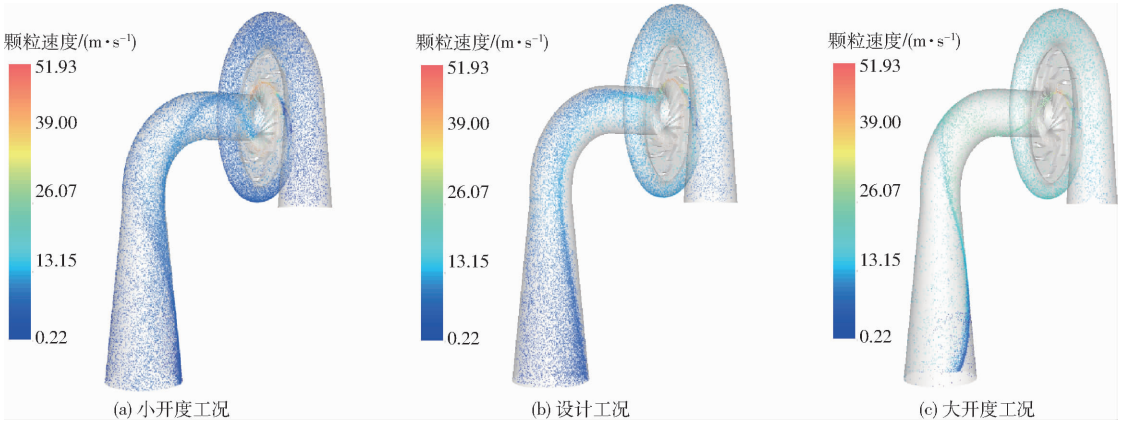

图 8 主流道内泥沙颗粒运动速度分布

Fig. 8 Distributions of sediment particle velocity in main channel

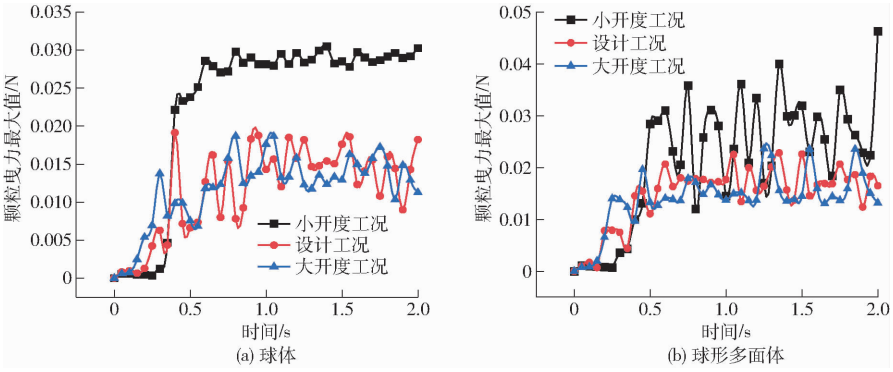

图 9　不同工况泥沙颗粒曳力最大值

Fig. 9　Maximum drag force of sediment particles at different opening cases

工况曳力最大值约 0.019 N；泥沙颗粒为球形多面体时小开度工况曳力最大值约 0.046 N，比相应工况球体颗粒力最大值大 34.78%，而设计工况与大开度工况曳力最大值约 0.023 N。3 种工况下球形多面体泥沙颗粒曳力最大值明显比球体颗粒大，说明球形多面体颗粒因为有尖角在水中受到的曳力比圆形球体大。

3.2　水轮机导水机构泥沙冲蚀磨损分析

图 10 为大开度工况注入球形多面体泥沙颗粒后导水机构磨损率分布，可以看出发生磨损较为明显的位置在临近蜗壳鼻端的固定导叶与活动导叶的前缘处，主要原因是泥沙颗粒从蜗壳进入导水机构内受重力与水流携带共同作用，在该部位形成富集并产生强烈撞击，与某水电站混流式水轮机活动导叶的磨损情况较为一致。图 11 为大开度工况注入球形多面体泥沙颗粒后导水机构泥沙颗粒碰撞强度及滑动距离平均最大值随时间的变化，碰撞强度用于分析冲击磨损，可以看出由于泥沙颗粒与导叶接触时产生摩擦撞击，活动导叶的碰撞强度最大值比固定导叶大 74.13%，说明泥沙颗粒对活动导叶的冲击磨损强于固定导叶；滑动距离是粒子在碰撞过程中平行于发生碰撞的边界三角形平面移动的距离，用于分析剪切磨损，可以看出固定导叶滑动距离平均最大值比活动导叶大 21.43%，说明泥沙颗粒

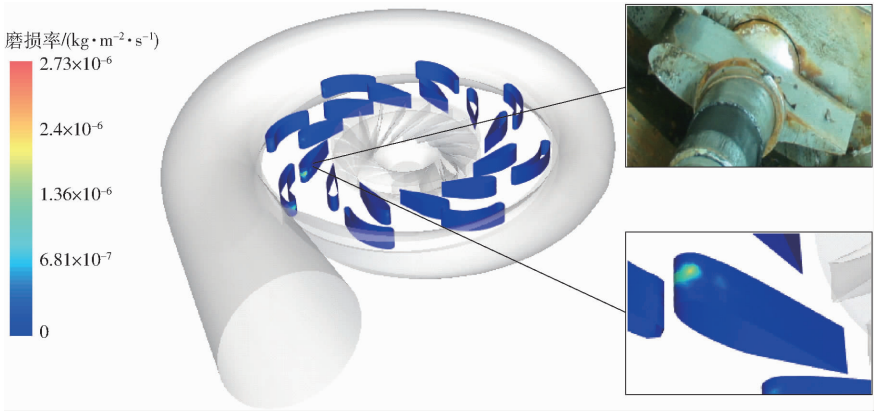

图 10　大开度工况导水机构磨损率分布

Fig. 10　Distribution of erosion rate of guide vane at big opening case

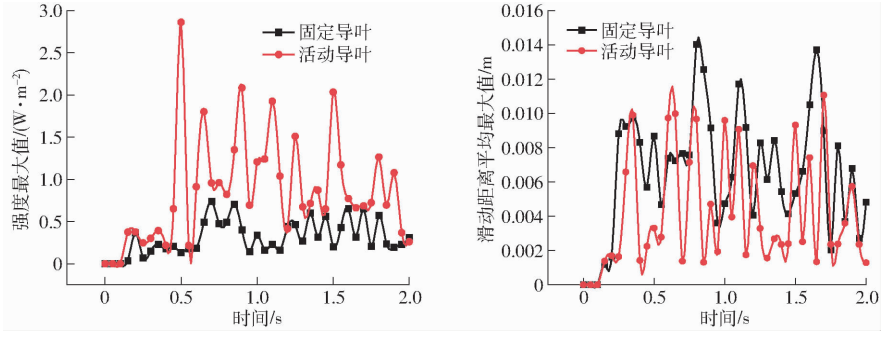

图 11　大开度工况导水机构颗粒碰撞强度及滑动距离平均最大值

Fig. 11　Maximum intensities and sliding distance of particles in wicket gate at big opening case

对固定导叶的剪切磨损强于活动导叶。

3.3 水轮机转轮泥沙冲蚀磨损分析

图 12 为设计工况水轮机转轮叶片工作面磨损情况,可以看出两种泥沙颗粒形状得到的叶片工作面磨损形态为椭圆形,位于叶片出水边靠近下环处,球体颗粒磨损的面积要比球形多面体的大 1 倍多,说明在转轮内受旋转离心力与水流作用对叶片工作面出水边位置产生碰撞的球体颗粒数量比球形多面体颗粒多,才导致其与叶片的撞击磨损面积更大,但球形多面体颗粒的最大磨损率是球体颗粒的 4 倍多,说明球形多面体颗粒因为存在尖角对壁面的磨损程度要比球体颗粒大,在叶片靠近进水边 1/3 位置还有轻微磨痕。图 13 为小开度工况注入球形多面体颗粒后叶片工作面的磨损情况,可以看出磨损严重区域为靠近叶片进水边呈鱼鳞状,周边及靠近下环处有麻点状分布磨痕,与文献[30]中通过试验得到的叶片磨损情况基本一致。图 14 为大开度工况注入球形多面体颗粒后转轮叶片的磨损情况,磨损发生在叶片进水边靠近下环处,与某水电站混流式水轮机转轮实际磨损情况较为一致。可以看出采用的 DEM - CFD 耦合方法预测水轮机的磨损情况与实际电站磨损是比较接近的。在球形多面体粗沙水流下设计工况、大开度工况、小开度工况转轮叶片工作面最大磨损率分别为 4.39×10^{-5}、1.27×10^{-5}、5.56×10^{-6} kg/(m^2·s),说明设计工况与大开度工况转轮叶片磨损要重于小开度工况,所以在汛期控制水轮机在小开度工况运转对泥沙磨损是有利的,可延长水轮机的工作期限和工作寿命。

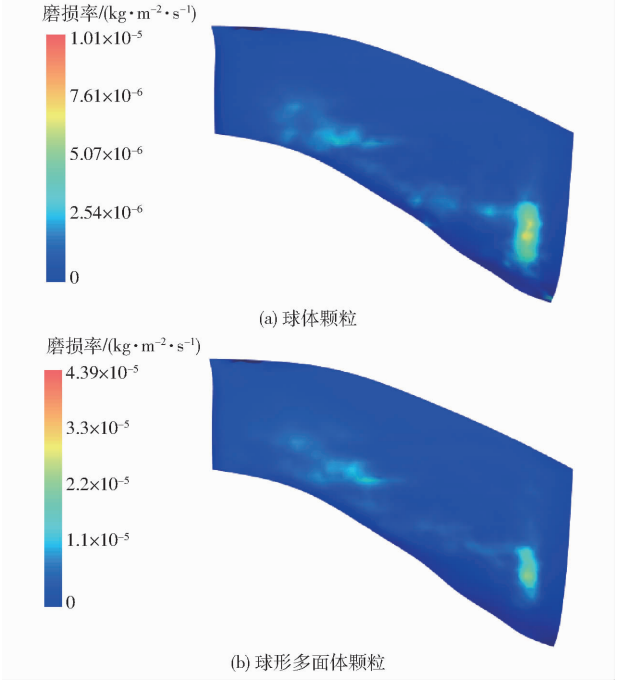

图 12 设计工况转轮叶片工作面磨损率分布

Fig. 12 Distributions of erosion rate on suction blade at design case

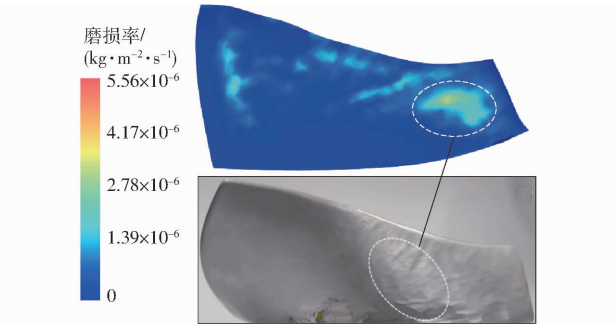

图 13 小开度工况转轮叶片工作面磨损情况

Fig. 13 Erosion on suction blade at small opening case

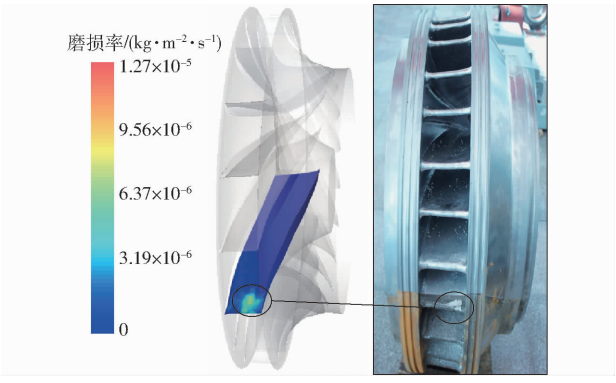

图 14 大开度工况转轮叶片磨损情况

Fig. 14 Erosion on blade at big opening case

3.4 水轮机尾水管泥沙冲蚀磨损分析

3 种工况球形多面体颗粒入射下尾水管磨损情况如图 15 所示。从图 15a 可以看出,小开度工况尾水管磨损主要发生在弯管段呈条带状,磨损面积较大且最大磨损率为 2.23×10^{-7} kg/(m^2·s),与某电站混流式水轮机尾水管磨损情况基本一致;从图 15b 可以看出,设计工况尾水管磨损位置在弯管段与直锥管段交接处,呈横条状且面积较小磨损程度也相对较轻,最大磨损率在 3 种工况中最小,为 7.34×10^{-8} kg/(m^2·s),因为在图 8b 中尾水管内泥沙颗粒随水流运动较为平顺,对管壁的冲蚀磨损也最小;从图 15c 可以看出,大开度工况尾水管磨损位置在弯管段曲率最大处,最大磨损率为 5.06×10^{-6} kg/(m^2·s),是 3 种工况中最大的,呈螺旋条纹状,与图 8c 中的泥沙颗粒运动分布状态较为一致,说明泥沙随水流运动对边界壁面的碰撞是造成壁面磨损形态的主要原因。

4 结论

(1)将真实泥沙颗粒外形用于混流式水轮机泥沙磨损的 DEM - CFD 耦合计算,GPU 加速可明显节省 DEM - CFD 耦合计算成本,单 GPU 比 8 核 CPU

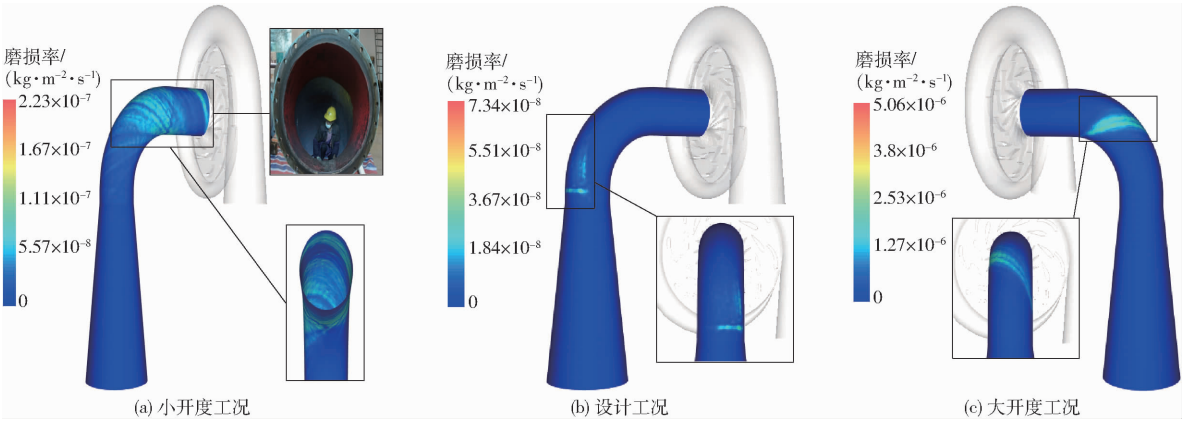

图 15　尾水管泥沙磨损率分布

Fig. 15　Distributions of sediment erosion rate in draft tube

节省耗时约 57.5%。

(2)粗沙水流下泥沙颗粒相互碰撞后随流性运动规律受不同工况影响,经过蜗壳、导水机构及转轮后,在尾水管内设计工况的颗粒运动较为平滑顺直,而小开度工况在弯管段内呈现“短螺旋”,大开度工况则出现“长螺旋”。小开度工况泥沙颗粒曳力最大值比设计工况与大开度工况大,球形多面体泥沙颗粒曳力最大值比球体颗粒大。

(3)大开度工况导水机构泥沙磨损出现在临近蜗壳鼻端的固定导叶与活动导叶前缘端部,泥沙颗粒对活动导叶的冲击磨损比固定导叶大,而对活动导叶的剪切磨损比固体导叶小。设计工况转轮叶片工作面磨损位置在叶片出水边靠近下环处呈椭圆状,球体颗粒磨损面积比球形多面体颗粒大,但球形多面体颗粒最大磨损率是球体颗粒的 4 倍多。小开度工况转轮叶片工作面磨损区域靠近叶片进水边中上部呈鱼鳞麻点状,大开度工况转轮叶片磨损位于叶片进水边靠近下环处。由于设计工况与大开度工况转轮叶片最大磨损率都比小开度工况大,所以在汛期控制水轮机在小开度工况运行是有利的。小开度工况尾水管磨损位置在弯管段呈条带状且面积较大,大开度工况在弯管段曲率最大处呈螺旋条纹状。该方法预测的磨损部位与文献试验结果及电站水轮机实际磨损情况一致。

参　考　文　献

[1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(8):2806－2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(8):2806－2818. (in Chinese)

[2] 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.
LU Li, LIU Juan, YI Yanlin,et al. Evaluation on sand abrasion to Baihetan hydraulic turbines[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 67－74. (in Chinese)

[3] 陆力,彭忠年,王鑫,等. 水力机械研究领域的发展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):442－450.
LU Li, PENG Zhongnian, WANG Xin, et al. Review on hydraulic machinery research[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 442－450. (in Chinese)

[4] SAROJ G, HARI P N, NIRMAL A, et al. Sediment erosion in low specific speed Francis turbines: a case study on effects and causes[J]. Wear, 2020, 442－443:203152.

[5] SAILESH C, BJORN W S, HARI P N, et al. Review on numerical techniques applied in impulse hydro turbines[J]. Renewable Energy, 2020, 159:843－859.

[6] 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.

[7] KOIRALA R, THAPA B. A review on flow and sediment erosion in guide vanes of Francis turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75: 1054－1065.

[8] RAJKARNIKAR B, NEOPANE H P, THAPA B S. Development of rotating disc apparatus for test of sediment-induced erosion in Francis runner blades[J]. Wear, 2013, 306(1－2):119－125.

[9] 田文文,刘小兵,李佳楠,等. 高水头水电站混流式水轮机导叶泥沙磨损试验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(8): 686－692.
TIAN Wenwen, LIU Xiaobing, LI Jia'nan, et al. Experimental study on sediment abrasion over guide vanes in mix-flow hydroturbines of high head hrdropower stations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(8): 686－692. (in Chinese)

[10] 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, 2020, 35(4): 436－443.

PANG Jiayang, ZHANG Huizhong, YANG Jianming, et al. Numerical and experimental study on sediment erosion of Francis turbine runner for hydropower stations[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(4): 436 - 443. (in Chinese)
[11] 李嘉兴,王福军, 陈鑫. 基于双流体模型的尊村泵站双吸离心泵泥沙磨损[J]. 科学通报, 2019, 64(36): 3856 - 3866.
LI Jiaxing, WANG Fujun, CHEN Xin. Erosion wear on a double-suction centrifugal pump of the Zuncun Pumping Station based on two-fluid model[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(36): 3856 - 3866. (in Chinese)
[12] 资丹,王本宏,王福军,等.开机组合对泵站进水系统泥沙浓度分布的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(7):59 - 68.
ZI Dan, WANG Benhong, WANG Fujun, et al. Influences of start-up pump units on the sediment concentration for the intake system of a pumping station[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 59 - 68. (in Chinese)
[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.
LI Yanhao, GUO Bao, XIAO Yexiang. Numerical study of hydro-abrasive erosion in high-head Francis turbine runner[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(2): 112 - 120. (in Chinese)
[14] 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.
HAN Wei, CHEN Yu, LIU Yi, et al. Prediction of erosional shape evolution in end-surface clearance of turbine guide vane[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 100 - 107. (in Chinese)
[15] 张映波,赵子龙,钱忠东. 双吸式离心泵叶片吸力面泥沙磨损破坏规律与形成机制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2):202 - 207.
ZHANG Yingbo, ZHAO Zilong, QUAN Zhongdong. Analysis of sediment erosion at suction side of double suction centrifugal pump blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):202 - 207. (in Chinese)
[16] 施卫东,施亚,高雄发,等. 基于 DEM - CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10): 176 - 185.
SHI Weidong, SHI Ya, GAO Xiongfa, et al. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 176 - 185. (in Chinese)
[17] 夏铖,赵睿杰,施卫东,等. 基于 DEM - CFD 耦合的泵内颗粒流动特性研究[J]. 工程热物理学报,2021,42(2):357 - 369.
XIA Cheng, ZHAO Ruijie, SHI Weidong, et al. Numerical investigation of particle induced erosion in a mixed pump by DEM - CFD coupled method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 357 - 369. (in Chinese)
[18] 邵文博,赵睿杰,张德胜. 基于全耦合 CFD - DEM 方法的多级混流泵磨损模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2020, 35(5):640 - 648.
SHAO Wenbo, ZHAO Ruijie, ZHANG Desheng. Erosion of multistage mixed flow pump based on fully coupled CFD - DEM method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(5): 640 - 648. (in Chinese)
[19] 黄思,黄家兴,莫宇石,等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的离心泵内过流部分的磨损特性研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1):62 - 69.
HUANG Si, HUANG Jiaxing, MO Yushi, et al. Study on wear properties of the flow parts in a centrifugal pump based on EDEM - Fluent coupling[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 62 - 69. (in Chinese)
[20] 姚利明,刘巨保,张宏岩,等. 缩径管内两相流砂粒碰撞和冲蚀特性研究[J]. 中国机械工程,2018,29(6):674 - 681.
YAO Liming, LIU Jubao, ZHANG Hongyan, et al. Study on sand collisions and erosion characteristics of two phase flow in contraction pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(6): 674 - 681. (in Chinese)
[21] RAHUL T, SUBODH K, AVI L. Particulate flow and erosion modeling of a Pelton turbine injector using CFD - DEM simulations[J]. Powder Technology, 2022, 399:117168.
[22] RAHUL T, SUBODH K, AVI L. Assessment of erosive wear performance of Pelton turbine injectors using CFD - DEM simulations[J]. Powder Technology, 2022, 408:117763.
[23] DEM TECHNICAL MANUAL[Z]. Florianópolis: ESSS, 2023.
[24] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. Powder Technology, 1989, 58(1):63 - 70.
[25] 王福军.流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J].农业机械学报,2016,47(2):1 - 14.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):1 - 14. (in Chinese)
[26] 刘琦,龙新平,陈正文,等.90°弯管液固两相流动冲蚀磨损的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(5):443 - 450.
LIU Qi, LONG Xinping, CHEN Zhengwen, et al. Numerical simulation of erosion damage in liquid-solid elbow flow[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(5):443 - 450. (in Chinese)
[27] 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.
SU Jiahui, GUO Zhiwei. The applicability of erosion models based on erosion equations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4):104 - 109. (in Chinese)
[28] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact, part2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259(1 - 6):102 - 109.
[29] MAZUMDER Q H, SHIRAZI S A, MCLAURY B. Experimental investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbows[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 130(1):244 - 254.
[30] GAUTAM S, ACHARYA N, LAMA R, et al. Numerical and experimental investigation of erosive wear in Francis runner blade optimized for sediment laden hydropower projects in Nepal[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 51: 101954.