排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 12 月 Dec. 2015 | 第 33 卷 第 12 期 Vol. 33 No. 12
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0161

离心式泥泵过流部件的磨损特性

彭光杰[1]，王正伟[2]，付硕硕[3]
（1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084；3. 天津市峰润科技发展有限公司，天津 300134）


彭光杰

摘要：基于固液两相流理论，应用欧拉-拉格朗日法模拟了离心式泥泵不同流量及泥沙浓度下的定常固液两相流场，应用 FINNIE 预估模型进行了磨损特性计算，着重研究了泥泵叶轮、压水室表面的磨损规律. 研究结果表明，随着泥沙浓度增大，泥泵的叶轮、压水室表面的磨损率相对值相应增大；压水室表面的磨损率相对值在小流量的值较高；叶轮的磨损率相对值的最大值出现在小流量区域；压水室表面的磨损率相对值比叶轮表面要高；泥泵在高效区运行，泥泵过流部件的磨损率相对值较低.

关键词：离心式泥泵；固液两相流；数值模拟；磨损率；叶轮；压水室表面
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)12-1013-06

彭光杰，王正伟，付硕硕. 离心式泥泵过流部件的磨损特性[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(12)：1013-1018.

PENG Guangjie，WANG Zhengwei，FU Shuoshuo. Wear characteristics of flow parts of centrifugal dredge pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2015，33(12)：1013-1018.(in Chinese)

Wear characteristics of flow parts of centrifugal dredge pump

PENG Guangjie[1]，*WANG Zhengwei*[2]，*FU Shuoshuo*[3]
(1. National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China；2. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084，China；3. Tianjin Fengrun Science & Technology Co.，Ltd.，Tianjin 300134，China)

Abstract：The relationship between the wear rates on the surfaces of the impeller as well as volute and the sediment concentration was investigated using the distribution of the wear rates. An Eulerian-Lagrangian computational fluid dynamics(CFD) procedure was used to simulate steady liquid-solid two-phase flow for various pump operating conditions. The FINNIE model was used to predict the abrasion of the surface of impeller and volute. It was found that the relative value of wear rate of impeller and casing surface increased with the increase of sediment concentration；it was larger at the low flow rate of the pump，while the value was lower in the high efficiency condition of the pump. The relative value for the casing surface is larger than that for the impeller surface. The relative value for flow parts is low in the high efficiency area of the pump.

Key words：centrifugal dredge pump；solid-liquid two-phase fluids；numerical simulation；wear rate；impeller；casing surface

收稿日期：2015-07-18；**网络出版时间**：2015-12-16
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151216.1553.016.html
基金项目：江苏大学高级人才科研启动基金资助项目(12JDG097)；江苏高校优势学科建设工程资助项目；水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(sklhse-2014-E-01)
作者简介：彭光杰(1973—)，男，湖南洞口人，助理研究员，博士(pgj@ujs.edu.cn)，主要从事多相流泵研究.
王正伟(1967—)，男，浙江东阳人，教授，博士生导师(wzw@mail.tsinghua.edu.cn)，主要从事流体机械故障诊断研究.

随着中国沿海港口基础设施、深水航道建设工程的发展,为中国疏浚业带来迅速发展的机遇. 中国疏浚制造业正以惊人的速度发展,已成为名副其实的挖泥船建造大国. 而泥泵是挖泥船的关键设备,每年对泥泵及泥泵配件,尤其是泥泵的过流耐磨部件的需求量不断增加. 严重的磨损使泥泵本身的结构受到破坏,影响运行的可靠性和稳定性,导致泥泵效率、扬程降低,过流部件使用寿命缩短,更换和检修频繁. 研究固液两相流在不同工况下过流部件的磨损特性,对指导泥泵的运行和设计具有重要意义.

随着计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的发展和计算机性能的提高,采用数值模拟方法研究流体机械内部两相流成为可能. PATANKAR N. A. 等[1-2]采用LNS方法对颗粒流动进行数值模拟,在欧拉型网格上求解流体相连续性和动量方程,采用拉格朗日逼近法模拟颗粒相,在流体相动量方程中处理颗粒与流体之间的动量交换;吴伟章等[3]利用 $k-\varepsilon-A_p$ 两相湍流模型计算水轮机转轮中泥沙固液两相湍流,并根据液相和固相三维流速场的计算结果数值预估转轮叶片表面的泥沙磨损. 赵万勇[4]采用数值模拟,证明了包含叶轮口环及前后泵腔计算域的计算结果更为准确. 李仁年等[5]利用 $k-\varepsilon$ 两方程模型和SIMPLE算法,对渣浆泵的内部流场进行了数值模拟. 李昳等[6]采用 $k-\varepsilon-A_p$ 模型模拟了脱硫泵内固液两相流动,并对3种直径的颗粒浓度分布、速度分布及磨损特性进行了研究. 刘小兵[7]利用Eulerian-Lagrangian混合湍流模型低浓度沙水中运行的水轮机的泥沙磨损进行了数值模拟研究,通过对水轮机导叶磨损率的计算,其结果与实际较为吻合. 彭光杰等[8]采用欧拉-拉格朗日法模拟了水轮机过流部件的磨损情况,并与实测结果进行对比,吻合很好. 施卫东等[9]采用Mixture多相流模型,对一污水处理厂用潜水轴流泵中固液两相流动进行了数值计算,揭示了不同颗粒固相体积分布和颗粒直径条件下潜水轴流泵流道内的固液两相流动规律. 叶晓琰等[10]基于Mixture混合模型,对高剪切匀浆泵进行固液两相流的数值模拟,分析了流量和转速对剪切泵内流场的影响规律. 吴波[11]应用渣浆泵计算流体动力学分析方法,对离心式渣浆泵全流道内的固液两相流动进行数值模拟,分析了叶片参数及浆体性质对固体颗粒冲蚀特性的影响规律,对渣浆泵的磨损进行了预测. 张恒[12]应用多流体模型和单颗粒动力学模型,对变工况下渣浆泵叶轮内固液两相湍流进行数值模拟,研究固相初始浓度、固相粒径、混合物流量以及叶轮转速对颗粒浓度分布、速度场分布、颗粒运动轨迹和冲蚀特性的影响. 熊茂涛[13]应用Mixture模型,对含沙水流中离心式水泵内部进行固液两相流场模拟,分析了浓度、速度、压力等流动参数在泵内的分布规律及其相互影响,研究了泵的磨损情况. 由于输送介质一般为固液两相甚至多相流,固体颗粒在流体机械内的运行规律比较复杂,学者根据各自研究对象和研究方法得出的结论不尽相同.

文中对某离心式泥泵进行固液两相流数值模拟,分析不同浓度、不同流量工况下压水室及叶轮表面的磨损情况,并对泥泵多种工况进行综合分析,为泥泵设计提供参考.

1 固液两相流基本理论

两相流动规律的数值模拟建立在清水流场的计算基础上,目前主要有2种数值计算方法处理两相流:欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法. 欧拉-欧拉法的概念就是将颗粒相当作拟流体,认为与流体相在宏观上占据同一空间而相互渗透. 当颗粒直径较大且其体积效应不能忽略时,采用拟流体概念误差较大,此时需将颗粒作为离散相进行分析,液相仍作为连续相进行处理. 由于文中计算的颗粒直径较大,故采用欧拉-拉格朗日法进行研究.

1.1 数学基本方程

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0, i=1,2,3, \tag{1}$$

式中:ρ 为密度;u_i 为速度,u_i 在 x,y,z 方向的分量分别为 u,v,w.

流体相时均控制方程

$$\frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\Phi\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\Phi\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)+S_\Phi+S_{p\Phi}, \tag{2}$$

式中:Φ 为通用变量,可以代表 u,v,w 等求解变量;S 是源项.

两相流的流体控制方程与单相流的控制方程相比,只多了一个流体与颗粒相互作用源项 $S_{p\Phi}$,其余各变量的定义和值均没有改变. 流体与颗粒相互作用的源项 $S_{p\Phi}$ 的定义见表1.

表 1　源项 $S_{p\Phi}$ 的定义
Tab. 1　Definition of $S_{p\Phi}$

方程	源项
连续性方程	0
x 方向动量方程	$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-u)$
y 方向动量方程	$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-v)$
z 方向动量方程	$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-w)$
湍流动能	0
湍流耗散	0

表中，$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-u)$，$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-v)$，$\sum_k \rho_k F_{Dk}(u_{pk}-w)$ 为单位体积内颗粒对流体的阻力源项，其中，F_{Dk} 为颗粒与流体之间的作用力.

1.2　磨损预估模型

目前存在很多磨损模型来分析过流部件表面被固体颗粒撞击而遭磨损的问题，比较典型的有如下几种：FINNIE[14]、AHLERT[15]提出的磨损率 E_r 模型，磨损率 E_r 定义为壁面单位面积上材料磨耗的质量与单位体积流体含沙量之比；野崎次男根据秘鲁 18 个水电站有关磨损的调查资料，给出估算水轮机磨损强度的公式[16]；GRANT 和 TABAKOFF 给出单位质量的粒子碰撞固壁所产生的质量磨损率 E[7]. 其中，FINNIE 模型与其他磨损预估模型相比，公式简单，经验系数少，易在计算中实现，而且 FINNIE 模型非常适用于塑性材料和小冲角的冲蚀磨损. 文中过流部件材料采用耐磨钢，兼有良好的韧性和塑性，因此采用 FINNIE 模型，详细介绍参考文献[17].

固体粒子对壁面的磨损是与粒子的运动情况、粒子特性和壁面特性相关的函数. 对大多数金属壁面，磨损率与粒子的冲击角度和速度相关，其关系就是 FINNIE 模型，公式为

$$E_r = k v_p^n f(\alpha), \tag{3}$$

式中：E_r 为磨损率；k 为经验系数；v_p 为颗粒速度；n 取值为 2；α 为颗粒运动轨迹线与壁面的夹角；冲击角函数为

$$f(\alpha) = \begin{cases} \dfrac{1}{3}\cos^2\alpha, & \tan\alpha > \dfrac{1}{3}, \\ \sin 2\alpha - 3\sin^2\alpha, & \tan\alpha \leqslant \dfrac{1}{3}. \end{cases} \tag{4}$$

对固体壁面的磨损通过式(5)进行计算：

$$E_{rr} = E_r N m_p. \tag{5}$$

在模拟计算时，将 FINNIE 模型运用到软件中，运用单个典型粒子替代许多真实粒子，m_p 为粒子质量，N 为单位时间内粒子数量，E_{rr} 的单位是 kg/s，在后处理时出现磨损率密度的概念 $\rho_{E_{rr}}$，即单位面积上的磨损率，由于缺乏材料的预估模型常数的准确值，故磨损率的值是颗粒对固体壁面磨损的定性预估，而不能定量预估磨损值. 文中采用磨损率相对值 E_{rrr} 进行分析，E_{rrr} 值为研究对象总的磨损量与一固定值之比，总的磨损量通过对 $\rho_{E_{rr}}$ 积分而得，其中固定值略大于总的磨损量的最大值.

2　固液两相流数值模拟

2.1　泥泵基本参数

设计流量为 9 000 m^3/h，扬程为 34 m，转速为 258 r/min，泵进口直径为 800 mm，出口直径为 750 mm，叶轮直径为 1 940 mm，叶片宽度为 396 mm，叶片数为 3. 具体结构见图 1，为离心式双泵壳结构.

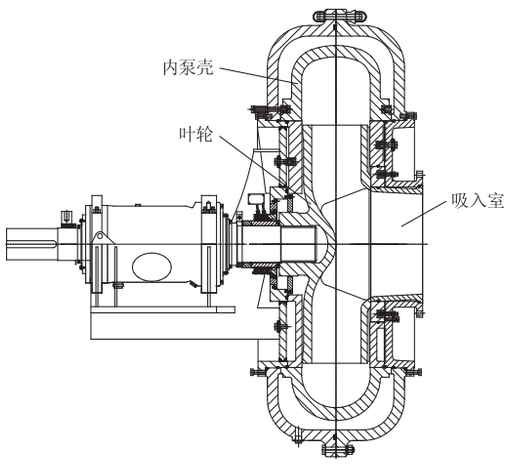


图 1　泥泵结构图
Fig. 1　Structure drawing of dredge pump

2.2　三维物理模型

泥泵流道由吸入室、叶轮、压水室 3 部分组成，压水室由内泵壳内部流道形成. 如图 1，2 所示. 由于计算域形状比较复杂，计算时均采用非结构化网格，其中压水室网格单元数为 297 003，节点数为58 643；叶轮网格单元数为 387 933，节点数为 77 509，吸入室网格数单元为 138 778，节点数为 25 558.

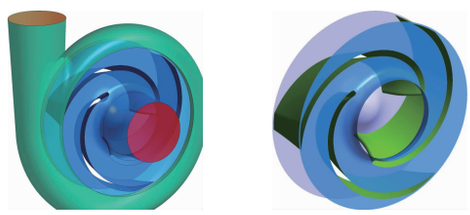


图 2　泥泵三维模型
Fig. 2　3D model of dredge pump

2.3 计算工况与边界条件

转速为258 r/min,流量分别为3 000,5 000,7 000,9 000,11 000,13 000,15 000 m^3/h,泥沙体积浓度为5%,10%.

在进口设置流量,固相设置质量流量和进口速度,进口速度与流体相流速相同;出口设置压力,其值为600 kPa;壁面为粗糙壁面,壁面粗糙度取0.2 mm. 离散项为固体颗粒,颗粒的形状假设为球形,与边壁完全弹性碰撞. 如果考虑颗粒间相互碰撞以及离散相颗粒对连续相流场的影响,计算量非常大,由于文中主要研究颗粒对壁面的磨损,在计算中忽略了颗粒间相互碰撞的影响和离散相颗粒对连续相流场的影响. 颗粒属性:最小直径为0.005 mm,最大直径为0.250 mm,中值粒径为0.200 mm,标准偏差0.150 mm,颗粒密度为1 950 kg/m^3.

3 计算结果及分析

3.1 过流部件表面磨损率相对值

图3给出了压水室(A)、叶轮叶片(B)、前盖板(C)、后盖板(D)表面磨损率相对值随流量的变化. 磨损率相对值大,表示磨损速度快,反之,磨损速度慢. C05表示泥沙体积浓度为5%,C10表示泥沙体积浓度为10%. 图4为泥泵的效率-流量曲线,高效区出现在流量11 000~15 000 m^3/h.

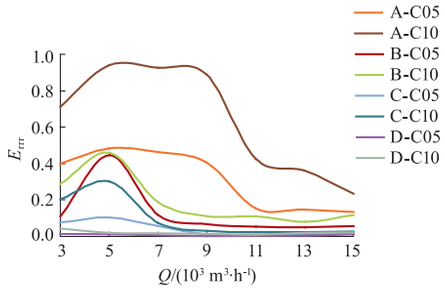


图3 磨损率相对值曲线

Fig. 3 Relative value curves of wear rate

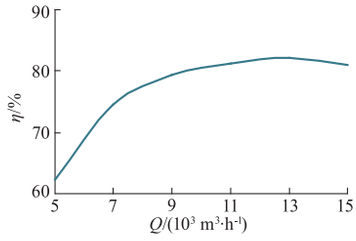


图4 泥泵效率曲线

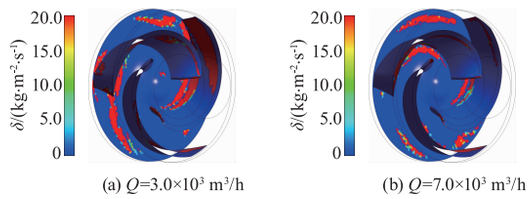
Fig. 4 Efficiency curve of dredge pump

在图3中,C10曲线均高于C05曲线,说明随着体积浓度的增大,磨损率相对值相应增大,输送介质的泥沙含量高会加剧泥泵过流部件的磨损. 分析图3中A曲线可知,压水室表面磨损率相对值随流量的增大呈现先增大后减小的规律,磨损率相对值最大值出现在流量为5 000~9 000 m^3/h,由于该区域是小流量区域,通过叶轮做功后的流体一部分通过出口流出,另一部分通过压水室隔舌处重新流回压水室,使得流速增大,加剧了压水室的磨损,随着流量的增大,从隔舌处流回到压水室的流量变少,泵的效率提高,磨损速度降低. 从图中B,C曲线可知,叶轮叶片和前盖板表面的磨损率相对值在流量5 000 m^3/h时最大,在流量9 000~15 000 m^3/h基本保持不变,说明在小流量区域,由于叶轮叶片间的回流比较严重,使得磨损加剧,而在大流量区域,由于流态好,效率高,磨损反而不严重. 分析图3中D曲线可知,叶轮后盖板磨损率相对值的最小值出现在11 000 m^3/h,此处为泥泵的高效区域. 总体上,压水室表面的磨损率相对值比叶轮表面要高;在叶轮中,叶片表面的磨损率相对值大于前后盖板的值.

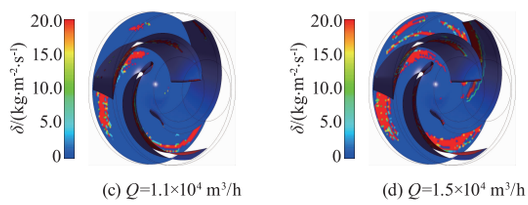
3.2 叶轮、压水室表面磨损率分布规律

根据计算结果,体积浓度为5%与10%所反应的磨损变化规律类似,因此文中采用体积浓度为5%的计算结果进行分析. 图5-7为叶轮和压水室不同流量下的磨损率δ分布图,红色代表磨损率δ值大的区域,蓝色代表磨损率值小的区域. 从图5,6中可知,叶轮的主要磨损区域分布在叶片的背面、叶片头部以及与叶片背面相交的后盖板面上,随着流量的增大,磨损区域逐渐转移到后盖板上. 这是因为颗粒随着液体从进口的轴线方向转向叶轮的离心方向时,由于固相密度大于液相密度,在较大的离心力作用下,颗粒与后盖板的碰撞概率较大,导致在后盖板以及叶片背面相交的后盖板面上磨损较为严重.

分析图7,压水室的主要磨损区域分布在第3断面至第8断面之间,在7 000 m^3/h时磨损相对较为严重;分析图8,压水室中固相的体积分数值高的区域也分布在第3断面至第8断面之间. 其原因是在第3-8断面附近的颗粒由于离心力的影响甩向蜗壳流道,颗粒聚集度较高,同时由于此处慢慢靠近泵体的出口,混合介质的相对流动速度较大,固体颗粒由于其运动速度的切向分量而不断对该部位进行摩擦切削,进而产生较为严重的磨损. 因此,压水室设计时,可以考虑采用在第3断面至第8断面之间进行加厚设计的方法,提高压水室的使用寿命.



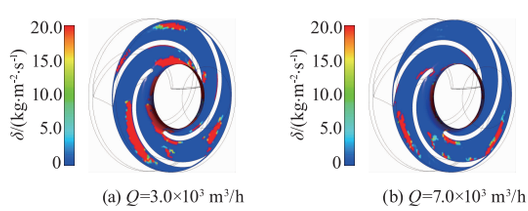
(a) Q=3.0×10³ m³/h　(b) Q=7.0×10³ m³/h



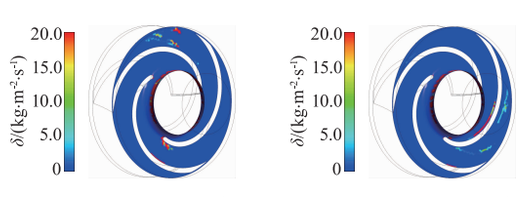
(c) Q=1.1×10⁴ m³/h　(d) Q=1.5×10⁴ m³/h

图 5　叶轮叶片和后盖板磨损率分布

Fig. 5　Wear rate distribution of impeller blade and back-cover



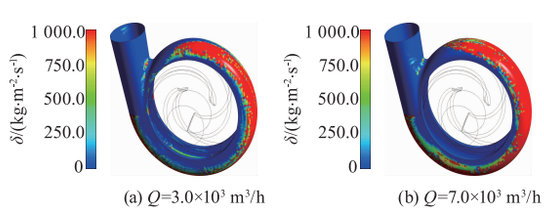
(a) Q=3.0×10³ m³/h　(b) Q=7.0×10³ m³/h



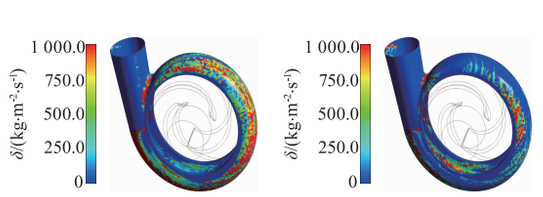
(c) Q=1.1×10⁴ m³/h　(d) Q=1.5×10⁴ m³/h

图 6　叶轮前盖板磨损率分布

Fig. 6　Wear rate distribution of impeller blade and front-cover



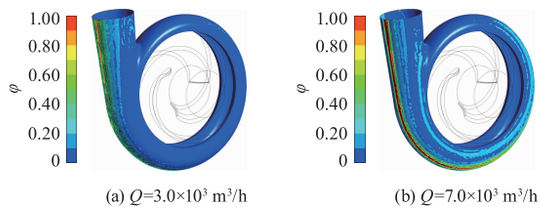
(a) Q=3.0×10³ m³/h　(b) Q=7.0×10³ m³/h



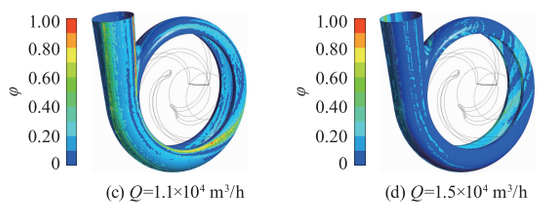
(c) Q=1.1×10⁴ m³/h　(d) Q=1.5×10⁴ m³/h

图 7　压水室磨损率分布

Fig. 7　Wear rate distribution of volute



(a) Q=3.0×10³ m³/h　(b) Q=7.0×10³ m³/h



(c) Q=1.1×10⁴ m³/h　(d) Q=1.5×10⁴ m³/h

图 8　压水室固相体积数分布

Fig. 8　Solid phase volume fraction distribution of volute

4　结　论

通过对泥泵不同浓度、不同工况进行的固液两相流数值模拟，预测了叶轮、压水室表面的磨损特性，主要结论如下：

1）随着泥沙体积浓度增大，泥泵过流部件表面的磨损率相对值相应增大.

2）压水室表面的磨损率相对值在小流量的值较大，在高效区，磨损率相对值较小. 叶轮叶片和前盖板表面的磨损率相对值的最大值出现在小流量区域. 压水室表面的磨损率相对值比叶轮表面要高.

3）泥泵在高效率运行，泥泵过流部件的磨损率相对值均比较低，因此泥泵在高效区域运行，不但能节约能源，而且能提高过流部件的使用寿命，尽量避免泥泵在小流量区域运行.

参考文献(References)

[1] PATANKAR N A, JOSEPH D D. Modeling and numerical simulation of particulate flows by the Eulerian – Lagrangian approach [J]. International journal of multiphase flow, 2001, 27(10): 1659 – 1684.

[2] PATANKAR N A, JOSEPH D D. Lagrangian numerical simulation of particulate flows[J]. International journal of multiphase flow, 2001, 27(10): 1685 – 1706.

[3] 吴伟章，吴玉林，任静，等. 水轮机转轮内部磨损预测[J]. 工程热物理学报，2000，21(6)：709 – 712.
WU Weizhang, WU Yulin, REN Jing, et al. Numerical simulation on silt abrasion in a hydraulic turbine runner [J]. Journal of engineering thermophysics, 2000, 21(6): 709 – 712. (in Chinese)

[4] 赵万勇,赵爽,王磊,等. 离心油泵口环间隙对泵腔内流动的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2013,39(1):33-36.
ZHAO Wanyong, ZHAO Shuang, WANG Lei, et al. Influence of seal ring clearance of centrifugal oil pump on flow characteristics of pump chamber[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013,39(1):33-36. (in Chinese)

[5] 李仁年,徐振法,韩伟,等. 渣浆泵内部流场数值模拟与磨损特性分析[J]. 排灌机械,2007,25(2):5-8.
LI Rennian, XU Zhenfa, HAN Wei, et al. Numerical simulation of interior flow and wear character in slurry pumps[J]. Drainage and irrigation machinery,2007, 25(2):5-8. (in Chinese)

[6] 李昳,何伟强,朱祖超,等. 脱硫泵固液两相流动的数值模拟与磨损特性[J]. 排灌机械,2009,27(2):124-128.
LI Yi, HE Weiqiang, ZHU Zuchao, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow and abrasion characteristics in desulfurization pump [J]. Drainage and irrigation machinery,2009,27(2):124-128. (in Chinese)

[7] 刘小兵. 水力机械泥沙磨损的数值模拟[J]. 四川工业学院学报,2000,19(2):79-84.
LIU Xiaobin. Numerical simulation of silt abrasive erosion in hydraulic machinery[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology,2000,19(2): 79-84. (in Chinese)

[8] 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.

[9] 施卫东,郭艳磊,张德胜,等. 大型潜水轴流泵转子部件湿模态数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24):72-78.
SHI Weidong, GUO Yanlei, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation on modal of large submersible axial-flow pump rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):72-78. (in Chinese)

[10] 叶晓琰,田莹莹,丁亚娜,等. 高剪切匀浆泵两相流动的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):407-411.
YE Xiaoyan,TIAN Yingying,DING Yana,et al. Numerical simulation of two phase flow in high shear pulp pump [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012,30(4): 407-411. (in Chinese)

[11] 吴波. 渣浆泵固液两相三维湍流及冲蚀磨损特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[12] 张恒. 渣浆泵叶轮内两相湍流数值模拟及磨损特性分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.

[13] 熊茂涛. 含沙水流中离心式水泵过流部件泥沙磨损的数值模拟[D]. 成都: 西华大学, 2006.

[14] FINNIE I. Some observations on the erosion of ductile metals[J]. Wear, 1972, 19(1):81-90.

[15] AHLERT K R. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of ANSI 1018 steel[D]. Oklahoma: University of Tulsa,1994.

[16] 高忠信,周先进. 水轮机转轮固液两相三维紊流计算及磨损预估[J]. 水利学报, 2002(9):37-43.
GAO Zhongxin, ZHOU Xianjin. Numerical prediction on silt wearing of turbine runner by means of two-phase turbulent flow simulation[J]. Journal of hydraulic engineering, 2002(9):37-43. (in Chinese)

[17] 彭光杰. 含沙水流对大型混流式水轮机运行特性的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2009.

(责任编辑 盛杰)