Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi: 10.3969/j. issn. 1674 - 8530. 16.0179



沙粒体积分数对离心泵磨损特性 影响的数值分析

赵伟国1,2*,郑英杰1,2,刘宜1,2,韩向东1,2



赵伟国

摘要: 为了研究含沙水流条件下沙粒体积分数对离心泵磨损特性的影响,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLE 算法,基于离散相模型(DPM) 和 Finnie 塑性冲蚀磨损模型,沙粒粒子注入选用 R-R分布拟合方法,对一比转数为 196 的单级单吸离心泵内固液两相流动进行全三维数值模拟.通过对比清水介质时泵外特性试验数据与数值模拟结果,验证了数值计算方法的可靠性. 研究结果表明: 随着沙粒体积分数的增加,离心泵过流部件的磨损强度逐渐增大,且磨损部位主要集中在叶片进口边、叶片背面、叶片工作面靠近叶片出口的位置以及蜗壳的第 2 断面和第 4 断面附近; 随着沙粒体积分数的增加,沙粒运动轨迹逐渐趋于紊乱,离心泵的扬程和效率逐渐降低.

关键词: 离心泵; 固液两相流; 数值模拟; 离散相模型; 磨损; 体积分数

中图分类号: TH311; S277.9 文献标志码: A 文章编号: 1674 - 8530(2018)02 - 0098 - 06

赵伟国,郑英杰,刘宜,等. 沙粒体积分数对离心泵磨损特性影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(2):98-103.

ZHAO Weiguo, ZHENG Yingjie, LIU Yi, et al. Numerical analysis of effect of sand volume fractions on erosion characteristics of centrifugal pump [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018,36(2):98 – 103. (in Chinese)

Numerical analysis of effect of sand volume fractions on erosion characteristics of centrifugal pump

ZHAO Weiguo^{1,2*}, ZHENG Yingjie^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, HAN Xiangdong^{1,2}

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

Abstract: In order to study the effect of sand volume fractions on erosion characteristics of the centrifugal pump in sand-laden water flow, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, SIMPLE algorithm, discrete phase model, Finnie ductile material erosion model, and Rosin – Rammler particle size distribution approach were employed. The full three-dimensional numerical simulation about solid – liquid two-phase flow in the single-stage single-suction centrifugal pump with a specific speed of 196 was carried out by using Fluent software, and the effect of wall roughness was taken into account. By comparing the test data of the external characteristics of fresh water pump to the numerical simulation result, the reliability of numerical calculation method was verified. The results show that with the increasing of sand volume fractions, the erosion intensity of the centrifugal pump increases gradually, and the key sand erosion position is concentrated on start side of blade, suction side of blade, pressure side of blade close to the blade outlet and the volute near the second section and the fourth section. Additionally, sand tracks

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-11-15; 网络出版时间: 2018-01-09

网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180109.1105.002.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51269011)

第一作者简介: 赵伟国(1979—),男,山东东营人,副教授(通信作者,zhaowg@zju.edu.cn),主要从事流体机械复杂流动理论研究.

第二作者简介: 郑英杰(1991—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生(zhengying)123@163.com), 主要从事多相流研究.

tend to be mussy, and head and efficiency of the pump decrease gradually. **Key words**: centrifugal pump; solid – liquid two-phase flow; numerical simulation; discrete phase model; erosion; volume fraction

中国河流多属于含泥沙河流,以黄河为例,黄河的年平均过沙量已经超过了 20 g/cm³[1],离心泵等水力机械在含沙水流下的流动非常普遍.然而在含沙水流条件下,离心泵很容易遭到泥沙冲击磨损的破坏,造成离心泵性能的下降,甚至影响泵的安全稳定及可靠运行^[2].因此研究离心泵在含沙水流下的磨损特性具有十分重要的意义.

目前随着计算流体力学的发展,国内外专家基 于 CFD 的方法已对离心泵内固液两相流的流动展 开了深入研究. 李仁年等[3] 通过改变沙粒粒径和体 积分数,数值模拟了小粒径条件下螺旋离心泵内的 流动,得出了螺旋离心泵内的磨损特性. 杨从新 等[4] 采用 Finnie 塑性冲蚀磨损模型,研究了不同粒 径对磨损特性的影响,并给出了含沙水流下离心泵 的主要磨损部位. 刘娟等[5] 对离心泵固液两相流动 进行了数值模拟,分析了固相颗粒密度、颗粒直径 和入射角对固体颗粒运动轨迹以及磨损特性的影 响. 汪家琼等[6] 采用颗粒离散相模型, 重点研究了 固体颗粒的滑移速度和颗粒体积分数对磨损特性 的影响. WU 等[7] 应用离散相模型对渣浆泵内进行 数值模拟,分析得出颗粒直径、泵转速对固相冲蚀 特性的影响. 然而, 目前对离心泵内固液两相流动 的数值模拟研究大多采用 Mixture 模型,而采用颗粒 离散相模型研究时大多只采用颗粒直径等值分布 的方法. 文中运用 Fluent 软件,采用颗粒离散相模 型,沙粒注入选用 Rosin - Rammler 分布(以下简称 R-R分布) 拟合方法, R-R分布拟合方法更加符 合自然界含沙水流中沙粒粒径分布特点. 通过数值 模拟得出体积分数对离心泵磨损特性以及沙粒运 动轨迹的影响规律,从而为研究离心泵的磨损规律 提供依据.

1 几何模型

选取 M196 – 100 型单级单吸离心泵为计算模型,基本设计参数为 $Q=100~\text{m}^3/\text{h}$, H=19~m, n=2~900~r/min; 叶轮的主要几何参数: 进口直径 $D_j=89~\text{mm}$, 出口直径 $D_2=140~\text{mm}$, 出口宽度 $b_2=27~\text{mm}$, 叶片数 Z=6. 采用 Pro/E 软件对泵进行三维造型,计算域模型如图 1 所示.

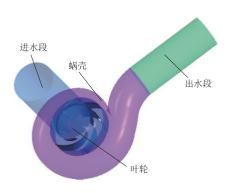


图 1 计算域模型 Fig. 1 Computational domain model

2 数学模型

2.1 离散相模型

沙粒粒子作为离散相,计算采用以下假设: 1) 流体连续,不可压缩,沙粒粒子为离散相,且各相物理性质均为常数; 2) 沙粒粒子为粒径均匀的球形颗粒,不考虑沙粒形状的改变; 3) 泵内部流动为定常流动; 4) 不考虑泵内空化的发生. 由于 DPM 模型中忽略了颗粒间的相互作用,模型对颗粒浓度的限制要求也必须考虑,计算沙粒的添加量不能太高,粒子的体积分数不大于 12% [8],并假定沙粒与壁面的碰撞为完全弹性碰撞,反弹系数为 1.

固相颗粒在固液两相流场中运动时主要受重力、附加质量力、绕流阻力、Saffman 升力、Magnus 升力和 Basset 力等作用力,为了方便分析,仅列出颗粒在 x 方向的受力平衡方程为

$$\frac{\mathrm{d}u_{p}}{\mathrm{d}t} = F_{D}(u - u_{p}) + \frac{g_{x}(\rho_{p} - \rho)}{\rho_{p}} + F_{V} + F_{p} + F_{x},$$
(1)

式中: $F_{\rm D}(u-u_{\rm p})$ 为单位质量颗粒所受到的阻力; u 为流体相速度,m/s; $u_{\rm p}$ 为颗粒速度,m/s; ρ 为流体密度, $k{\rm g}/{\rm m}^3$; $\rho_{\rm p}$ 为颗粒密度, $k{\rm g}/{\rm m}^3$; $g_{\rm x}$ 为 x 方向重力加速度, m/s^2 ; $F_{\rm v}$, $F_{\rm p}$ 分别为附加质量力和流场压力梯度引发的附加力; $F_{\rm x}$ 为颗粒所受其他外力的合力,由于横向速度梯度使颗粒产生自身旋转引起的附加力仅对 $d=1\sim10$ $\mu{\rm m}$ 的亚观尺寸颗粒有效,而文中进行数值计算的固相颗粒粒径较大,所以不考虑颗粒的自身旋转效应.

单位质量的固相颗粒所受 Basset 力为

$$F_{\rm B} = \frac{9}{d_{\rm p}\rho_{\rm p}} \sqrt{\frac{\rho\mu}{\pi}} \int_{t_0}^{t} \frac{{\rm d}(\,u - u_{\rm p})}{{\rm d}t} (\,t - t\,)^{-\frac{1}{2}} {\rm d}t\,, (\,2)$$

式中: d_p 为颗粒直径(mm) ; μ 为流体动力黏度(N • s/m²) .

在旋转坐标系中,式(2)中附加力还包括由于叶轮旋转引起的离心力和科氏力. 文中设置旋转轴为z轴,笛卡尔坐标系下,在x,y方向上单位质量颗粒的附加作用力分别为

$$\begin{cases} F_{p,x} = \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_p}\right] \omega^2 x + 2\omega \left[u_{y,p} - \frac{\rho_1}{\rho_p} u_{y,1}\right], \\ F_{p,y} = \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_p}\right] \omega^2 y + 2\omega \left[u_{x,p} - \frac{\rho_1}{\rho_p} u_{x,1}\right], \end{cases}$$
(3)

式中: ω 为颗粒的旋转角速度,rad/s; $u_{x,p}$, $u_{y,p}$ 分别为颗粒在x,y 方向上的速度,m/s; $u_{x,1}$, $u_{y,1}$ 分别为流体质点在x,y 方向上的速度,m/s.

2.2 Finnie 塑性冲蚀磨损模型

Finnie 提出的塑性材料冲蚀磨损的微切削理论是第一个较为系统定量表达磨损率与攻角关系的理论.为研究沙粒对离心泵壁面的磨损特性,在数值模拟计算时,离心泵过流部件的材料选用典型的塑性金属铝材料,用单位时间在单位面积内的质量磨损率 W_m 来研究不同条件下沙粒对离心泵过流部件壁面的磨损规律,质量磨损率为

$$W_{\rm m} = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{\rm Finnie}}{A_{\rm face}}, \tag{4}$$

其中

$$E_{\text{Finnie}} = \begin{cases} c \frac{m_{\text{p}} u_{\text{p}}^2}{\psi P K} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \rho_{\text{t}}, \alpha \leq \alpha_0, \\ c \frac{m_{\text{p}} u_{\text{p}}^2 \cos^2 \alpha}{\psi P K} \rho_{\text{t}}, \alpha > \alpha_0, \end{cases}$$
 (5)

式中: n 为单位时间内撞击壁面的颗粒数; $A_{\rm face}$ 为过流部件的冲蚀面积; $E_{\rm Finnie}$ 为 Finnie 塑性切削模型中靶材的质量磨损量; c 为有效冲击粒子比例, 由于文中只考虑有效撞击粒子的磨损效应, 所以取 $c=1;\psi$ 为切削长度与深度比, 近似取为 1; P 为材料塑性流动应力, 对于金属铝材料 P=50 MPa; α 为颗粒撞击角; α_0 为临界入射角, 对金属材料一般为 18. 43°; K 为冲击应力的垂直和水平分量比, K=2; ρ_1 为壁面材料密度, 取为 2. 65 g/cm³

2.3 R-R 分布拟合方法

Rosin - Rammler 分布模型为

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{d}\right)^{n'}},\tag{6}$$

式中: \bar{d} 为平均粒径; d 为沙粒粒径; n'为分布指数; Y_a 为粒径大于 d 的沙粒的质量分数.

3 计算方法

3.1 计算区域及网格

为了使数值模拟结果更接近真实情况,分别在吸入室进口前加了一段进水段,蜗壳出口后加了一段出水段,使水流充分发展. 计算区域包括进水段、叶轮、蜗壳、出水段. 进、出水段均采用结构化网格形式划分,叶轮和蜗壳采用非结构化网格形式划分,如图 2 所示. 对比分析数值模拟结果,验证其网格无关性,其结果如图 3 所示.

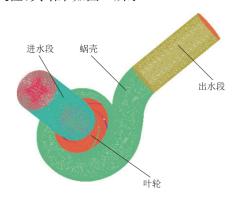


图 2 计算域网格

Fig. 2 Computational domain grids

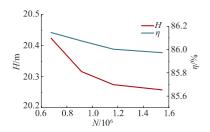


图 3 网格无关性分析 Fig. 3 Grid-independent analysis

从图 3 可以看出,随着网格数 N 的增加,扬程和效率都有下降的趋势,当网格数大于 1.1×10^6 时,计算结果趋于稳定,最终确定计算域网格数总数为 1.165.680.

3.2 边界条件

采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来简化和封闭方程组,数值求解采用 SIMPLE 算法,设置收敛精度为 10^{-5} . 进口边界条件采用速度进口,假定进口处只有轴向速度,轴向速度分布均匀,且进口处沙粒均匀分布,出口边界条件采用自由出流. 沙粒在进出口采用 Escape 边界条件,在各过流部件内壁面的边界

条件设置为 **Reflect**,且均为弹性碰撞. 假设壁面绝热且满足无滑移条件,近壁面区域采用标准壁面函数处理. 当采用 R-R 分布拟合方法时 $^{[8-10]}$,壁面粗糙度值设置为沙粒的平均粒径 \overline{d} .

4 计算结果及分析

根据如图 4 所示兰州段黄河泥沙颗粒级配曲线^[11-14],对黄河水中沙粒粒径进行 R-R分布拟合,得到粒径最大值、最小值、平均粒径及分布指数等参数,取沙粒平均粒径为 0.028 mm,沙粒体积分数分别为 1%,3%,5% 和 7%,在设计工况下进行计算分析并得到其过流部件的磨损情况.图中 α 为小于某粒径的泥沙百分数.

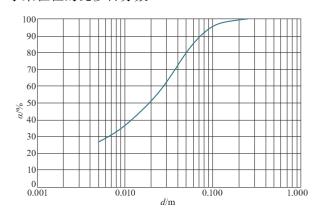


图 4 兰州段黄河泥沙颗粒级配曲线 Fig. 4 Sediment grading curves along Lanzhou reaches of the Yellow River

4.1 离心泵过流部件磨损云图

4.1.1 叶轮内磨损云图

图 5 所示为不同体积分数 α、下叶轮内各部位磨损情况. 由图 5 可知,沙粒体积分数为 1%时,叶片背面和工作面的磨损程度较轻,主要集中在靠近叶片进口边的位置,但叶片进口边磨损较重,已经形成严重的片状磨损带. 沙粒体积分数为 3%时,叶片背面出现很多磨损率超过 1.0 × 10⁻⁵ kg/(m²•s)的较重的麻点磨损,工作面在靠近叶片出口位置也出现了严重的磨损,叶片进口边的磨损部位进一步扩大,尤其在叶片进口边头部位置. 体积分数为 7%时,叶片背面磨损已经非常严重,在靠近叶轮前盖板和后盖板处,出现多处较大面积的磨损,叶片工作面在靠近叶片出口位置的磨损也有所加剧. 由此可知,叶片进口边为叶片磨损最为严重的区域. 这是由于当沙粒进入到叶轮内时,在叶轮的旋转作用下,沙粒非常容易与叶片进口边发生碰撞,导致进

口边磨损加剧.

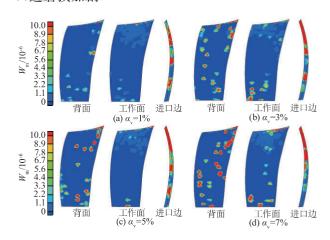


图 5 不同体积分数下叶轮内各部位磨损云图 Fig. 5 Erosion contour of impeller with different volume fractions

4.1.2 蜗壳内磨损云图

图 6 为不同体积分数下蜗壳磨损云图. 由图可知,沙粒体积分数为 1% 时,在蜗壳第 2 断面附近磨损较重,其他壁面磨损程度较轻,磨损率低于 3.3 × 10⁻⁶ kg/(m² • s). 体积分数为 3% 时,已经在第 2 断面附近形成严重的片状磨损,其磨损率已经超过了 1.0×10⁻⁵ kg/(m² • s),第 4 断面附近磨损也比较严重,磨损面积逐渐向其他断面扩大. 体积分数为 7% 时,在蜗壳第 2 断面以及第 4 断面附近的磨损已经非常严重,同时磨损已扩大到蜗壳所有其他断面.

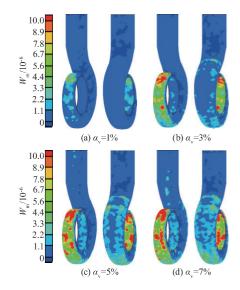


图 6 不同体积分数下蜗壳磨损云图 Fig. 6 Erosion contour of volute with different volume fractions

4.2 沙粒运动轨迹

图 7 所示为不同体积分数下沙粒运动轨迹的速

度图. 由图可知,沙粒由进水段进入叶轮后,在叶轮旋转作用下,沙粒的运动方向逐渐由轴向向径向过渡,使其非常容易与靠近叶轮进口的叶片进口边发生碰撞,因此叶片进口边的上半部分磨损非常严重. 沙粒经过叶片进口边后由于惯性易与叶片背面碰撞,而在靠近叶片出口时,径向速度逐渐转化为周向速度,此时易与叶片工作面相撞,因此叶片工作面靠近叶片出口的位置磨损较重. 当沙粒进入蜗壳后,沙粒速度超过了 10 m/s,由于蜗壳第 2 断面附近断面较窄,所以沙粒仍以较高速度在第 2 断面附近与蜗壳碰撞,因此蜗壳第 2 断面附近与蜗壳碰撞,因此蜗壳第 2 断面附近磨损非常严重,此后沙粒的速度逐渐下降,并以一定速度被水泵甩出.

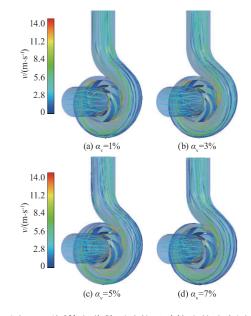


图 7 不同体积分数下沙粒运动轨迹的速度图 Fig. 7 Velocity vector distribution of particle tracks with different volume fractions

当体积分数为1%时,沙粒在泵内运动较平稳,沙粒从叶轮出来后基本在同一个平面内运动.随着体积分数的增加,沙粒在泵内运动轨迹逐渐趋于紊乱,尤其是在靠近叶轮出口及在蜗壳第2至第4断面附近,这就大大增加了沙粒与沙粒、沙粒与叶片及蜗壳碰撞的概率.

图 8 为不同体积分数下大粒径沙粒(d = 0.3 mm) 和小粒径沙粒(d = 0.005 mm) 的运动轨迹, 由图 8 可知,当体积分数为 1% 时,小沙粒大致沿着叶片的工作面运动,且在蜗壳内运动轨迹的旋转半径较小,而大沙粒运动逐渐背离工作面,开始向叶片背面偏移,这使得沙粒更加容易与叶片头部和叶片背面发生碰撞,在蜗壳内运动时沙粒轨

迹的旋转半径较大,大部分都集中在蜗壳内壁处,这种大小沙粒运动轨迹的分离变化较明显.这是由于小沙粒质量小,因此所受到的离心力也较小,对连续相流体的跟随性较好.相反,当沙粒粒径较大时,所受到的离心力也较大.而随着沙粒体积分数的逐渐增加,大小沙粒运动轨迹的分离变化并不是很明显,这可能是由于沙粒体积分数的增大,加大了沙粒间碰撞的概率,从而改变了沙粒原有的运动轨迹.

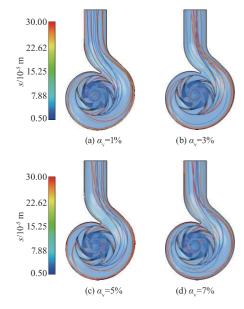


图 8 不同体积分数下沙粒运动轨迹的粒径分布图 Fig. 8 Sand diameter distribution of particle tracks with different volume fractions

4.3 沙粒体积分数对扬程效率的影响

图 9 为离心泵输送沙粒平均粒径为 0.028 mm,体积分数为 1%,3%,5%,7% 以及 9% 时的外特性曲线图.由图 9 可知,当沙粒平均粒径不变时,随着沙粒体积分数的增加,离心泵的扬程和效率均逐渐减小,这是因为随着沙粒体积分数的增加,沙粒的运动轨迹逐渐紊乱,沙粒对连续相的相对阻滞作用也随之增大,同时沙粒对离心泵过流部件的磨损破坏不断加剧,导致离心泵性能的下降.

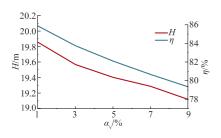


图 9 外特性曲线图 Fig. 9 External performance curves

5 结 论

- 1) 随着沙粒体积分数的增加,离心泵过流部件的磨损强度不断增加,主要磨损部位集中在叶片的进口边、叶片的背面、叶片工作面靠近叶片出口的位置以及蜗壳第2断面和第4断面附近.
- 2) 沙粒体积分数较小时,沙粒运动轨迹较为平稳;随着沙粒体积分数的增加,沙粒运动轨迹逐渐趋于紊乱,尤其是在靠近叶片出口及在蜗壳第2至第4断面附近.
- 3) 当沙粒平均粒径不变时,随着沙粒体积分数的增加,离心泵的扬程和效率不断降低.

参考文献(References)

- [1] 刘娟,许洪元,齐龙浩.水力机械中冲蚀磨损规律及抗磨措施研究进展[J].水力发电学报,2005,24(1):113-117.
 - LIU Juan, XU Hongyuan, QI Longhao. The development of study on the abrasive rules and anti-abrasive technique of hydraulic machines [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2005, 24(1):113-117. (in Chinese)
- [2] 周林玉. 偏离工况下离心泵的压力脉动和振动分析 [J]. 流体机械, 2015,43(2):52-55. ZHOU Linyu. Analysis on pressure fluctuation and vi
 - bration of a centrifugal pump for off-design conditions [J]. Fluid machinery, 2015,43(2):52 55. (in Chi-
- [3] 李仁年,韩伟,刘胜,等. 小粒径固液两相流在螺旋离心泵内运动的数值分析 [J]. 兰州理工大学学报,2007,33(1):55-58.
 - LI Rennian, HAN Wei, LIU Sheng, et al. Numerical analysis of interior flow in screw centrifugal pump for liquid solid two-phase medium with small size particles [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33(1):55-58. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 刘娟,许洪元,唐澍,等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(6):

54 – 59.

- LIU Juan, XU Hongyuan, TANG Shu, et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(6):54-59. (in Chinese)
- [6] 汪家琼,蒋万明,孔繁余.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 Jiaqiong, JIANG Wanming, KONG Fanyu, et al. Numerical simulation of solid liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump based on particle model [J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(11):53 60. (in Chinese)
- [7] WU Bo, YAN Hongzhi, XU Hailiang, et al. Numerical simulation about erosion characteristics of solid particle in slurry pump [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2012, 43(1):124-129.
- [8] Help navigator. ANSYS, release 15.0 ANSYS fluent theory guide [M]. New York: Ansys Inc, 2013.
- [9] 邵晨, 王小鹏, 邢桂坤,等. 石油化工装置离心泵最小流量浅析[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(6):51-54.
 - SHAO Chen, WANG Xiaopeng, XING Guikun, et al. Analysis of minimum flow of centrifugal pump used in petrochemical plant [J]. Process equipment & piping, 2015, 52(6):51-54. (in Chinese)
- [10] 范贤旗. 离心泵泥沙磨损机理的数值研究 [D]. 陕西: 西安理工大学,2011.
- [11] 赵啸冰. 渣浆泵内清水流场及离散固体颗粒轨迹的模拟与研究[D]. 北京: 清华大学,2002.
- [12] 董文龙,李昳. 离心泵内大颗粒下运动特性数值模拟与磨损分析 [J]. 机电工程,2015,32(3):324-327. DONG Wenlong, LI Yi. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump with major diameter particles [J]. Journal of mechanical & electrical engineering,2015,32(3):324-327. (in Chinese)
- [13] LI G, WANG Y, HE R, et al. Numerical simulation of predicting and reducing solid particle erosion of solid liquid two-phase flow in a choke [J]. Petroleum science, 2009,6(1):91-97.
- [14] LI Yi, ZHU Zuchao, HE Weiqiang, et al. Numerical simulation and experimental research on the influence of solid phase characteristics on centrifugal pump performance [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2012, 25(6): 1184 1189.

(责任编辑 盛杰)