

电动潜油离心泵叶轮冲蚀磨损研究

刘延鑫^{1,2}, 王旱祥¹, 汪润涛¹, 晁明伟³, 张震宁⁴, 黄海春⁴, 马振勇⁵

(1. 中国石油大学机电工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中国石油工程公司华东设计分公司, 山东青岛 266071; 4. 江苏省海洋油气钻井装备重点实验室, 江苏姜堰 225532;
5. 中国石油青海油田分公司采油一厂, 青海海西 816400)

摘要:针对油田特高含水阶段电动潜油离心泵叶轮冲蚀磨损问题,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散相模型并利用 SIM-
PLEC 算法进行求解,实现对电潜泵冲蚀磨损的数值模拟,并研究工况参数和叶片结构参数对电潜泵叶轮冲蚀磨损的影响。
结果表明:叶轮叶片吸力面是叶轮冲蚀磨损严重区域;随着砂粒浓度的升高及叶轮转速的提高,叶轮磨损速率增大;
随着粒径及出口安放角的增加,叶轮磨损速率先升高后降低;叶轮平均磨损率随着进口安放角的增加而降低。

关键词:电动潜油离心泵; 离散相模型; 湍流模型; 冲蚀磨损; 数值模拟

中图分类号: TE 933 **文献标志码:** A

引用格式:刘延鑫,王旱祥,汪润涛,等. 电动潜油离心泵叶轮冲蚀磨损研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),
2017,41(4):155-159.

LIU Yanxin, WANG Hanxiang, WANG Runtao, et al. Study on erosive wear of electric submersible pump's impeller[J].
Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(4):155-159.

Study on erosive wear of electric submersible pump's impeller

LIU Yanxin^{1,2}, WANG Hanxiang¹, WANG Runtao¹, CHAO Mingwei³,
ZHANG Zhenning⁴, HUANG Haichun⁴, MA Zhenyong⁵

(1. College of Mechanical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. East China Institute of China Petroleum Engineering and Construction Corporation, Qingdao 266071, China;
4. Jiangsu Key Laboratory of Offshore Oil and Gas Drilling Equipment, Jiangyan 225532, China;
5. The First Oil Production Plant of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Haixi 816400, China)

Abstract: In order to solve the erosive wear problems in the impeller in the high water-cut stage, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence
model, discrete phase model and SIMPLEC algorithm are employed to realize the simulation of an electric submersible pump's
(ESP) erosive wear. The effects of the working condition and structural parameters of the ESP are also studied. The results
show that the concave side of the impeller's blade is a serious eroded area. With the increases of the sand volume fraction and
the impeller speed, the impeller's wear rate goes up. With the increase of the particle size and outlet angle, the wear rate
firstly rises then reduces. Finally, the impeller's average wear rate reduces with the increase of the inlet angle.

Keywords: electric submersible pump; discrete phase model; turbulence model; erosive wear; numerical simulation

随着油田的不断开发,很多油田进入特高含水
开发阶段。电动潜油离心泵(以下简称“电潜泵”)
具有排量扬程范围大、功率大、适应性强、检泵周期
长、管理方便及经济效益显著的特点,在特高含水开

发阶段成为油田稳产增产的主要举升方式。然而由
于油井含砂体积分数也逐渐增多,导致井筒状况不
断复杂化,导致电潜泵寿命下降,经济效益逐年变
差。含砂导致叶轮出现严重的冲蚀磨损,引起泵效

收稿日期:2016-08-22

基金项目:国家重大专项(2011ZX05038-02);山东省自然科学基金项目(ZR2015EL012);中央高校基本科研业务费专项(17CX02022A)

作者简介:刘延鑫(1985-),男,讲师,博士,研究方向为油气井杆管柱力学及流体力学。E-mail: liuyanxin1985@163.com。

下降,影响设备正常运行,严重时会引起穿孔,引起泵筒穿孔甚至泵壳断裂、落井,因此有必要对叶轮进行磨损分析,研究磨损机理,以便于采取相应的防护措施。电潜泵是离心泵的一种,目前对离心泵的研究主要针对渣浆泵等大直径、卧式、叶轮-蜗壳式离心泵,其含砂体积分数基本在1%以上,固体粒径也比较大^[1-5];对电潜泵这种小直径、含砂体积分数相对较低(低于0.1%)、高转速、小粒径、叶导轮立式离心泵叶片磨损的研究较少,目前仅有王尊策、陈思等^[6-7]对其叶轮磨损进行了研究,但是在研究中只考虑了工况参数对叶轮磨损的影响,未开展叶轮结构参数对叶轮磨损影响的研究。由于采用CFD数值模拟方法^[8]计算冲蚀磨损可靠性强,成本低,周期短,因此,笔者利用fluent软件,采用离散相模型及磨损理论^[9-11],对电潜泵冲蚀磨损进行数值模拟,研究电潜泵冲蚀磨损规律,分析不同参数对电潜泵磨损影响。

1 基于离散相模型的固液控制方程

1.1 液相流动控制方程

电潜泵叶轮叶片型线是弯曲的,其流体的流线也是弯曲的,湍流呈现各向异性。与标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型相比,RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型修正了湍流黏度,并考虑平均流动中的旋转及旋流流动情况^[12],电潜泵液相湍流采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型较为合适,表示为

$$\frac{\partial(\rho_f k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_p - \rho_f \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G_k - C_{2\varepsilon} \rho_f \varepsilon). \quad (2)$$

式中, $x_i, x_j (i=1,2,3, j=1,2,3)$ 为坐标系, x_1, x_2, x_3 分别代表 x, y, z 坐标; u_i 为流体速度; t 为时间; ρ_f 为流体密度; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; μ_e 为等效黏性系数; G_p 为由浮力而产生的湍流动能; G_k 为速度梯度导致的湍动能; $C_{1\varepsilon}^*, C_{2\varepsilon}$ 为系数, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 。

1.2 离散相(砂粒)控制方程

在固液两相流中固体颗粒主要受到绕流阻力、重力、各种附加力、离心力、科氏力、Basset力和Magnus升力等作用力。固体颗粒受力控制方程为

$$m_s \frac{du_s}{dt} = \frac{\pi d_s^3 \rho_s}{6} \left[g(\rho_s - \rho_f) + F_D + F_V + F_P + F_{\text{other}} \right]. \quad (3)$$

式中, ρ_s 为砂粒密度; g 为重力加速度; F_D 为流体绕流阻力; F_V 为附加质量力; F_P 为压力梯度导致的附

加力; F_{other} 为离心力、科氏力、Basset力、Magnus升力等外力的总和。

1.3 磨损率计算模型

磨损率定义为在单位时间内颗粒作用在单位面积物体表面所切掉的材料质量。其计算公式^[13]为

$$R_{\text{wear}} = \sum_{p=1}^N \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) V^{b(V)}}{A_f}. \quad (4)$$

式中, R_{wear} 为单位面积材料的磨损率; $\dot{m}_p$ 为计算过程中砂粒 p 所代表的质量流率; $C(d_p)$ 为与砂粒粒径相关的函数,可取 $C(d_p) = 1.8 \times 10^{-9}$ ^[14]; α 为砂粒与壁面碰撞时的角度; $f(\alpha)$ 为与碰撞角度相关的函数,可取 $f(\alpha) = 1$; V 为砂粒的碰撞速度; $b(V)$ 为与砂粒碰撞速度相关的函数,可取 $b = 0$; A_f 为壁面计算单元的面积; N 为在面积 A_f 上发生碰撞的颗粒数目。

2 电潜泵叶轮冲蚀磨损数值模拟及其分析

2.1 电潜泵叶轮冲蚀磨损数值模拟模型

以W150型潜油离心泵为例进行数值模拟,其叶片为圆柱型叶片,叶轮叶片数为8。由于离心泵的叶轮流动区域几何非常不规则,所以采用适应性较强的四面体网格,并对流动较为复杂叶轮叶片部位的网格进行了局部加密,如图1所示。

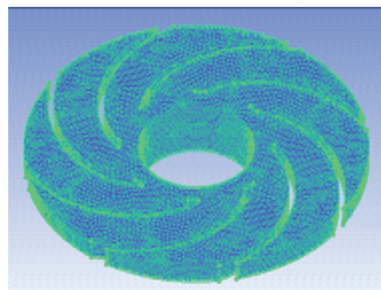


图1 叶轮流道网格

Fig.1 3D flow field model of impeller

(1) 模型选择与坐标系处理。选择离散相(DPM)模型,湍流模型选取RNG $k-\varepsilon$ 模型。流体排量为 $150 \text{ m}^3/\text{d}$,砂粒的直径为 0.05 mm ,砂粒进口体积分分数设为 0.3% ,砂粒密度设定为 $2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

针对可动流域问题,选择多重参考系模型(MRF模型),将叶轮流域设置为运动坐标系,旋转速度为 $2300 \text{ r}/\text{min}$ 。

(2) 进出口边界条件。液相:叶轮入口采用速度进口(velocity-inlet),设置液相的出口边界为自由流动(outflow)。颗粒相出口设置为逃逸。

固相入口条件:将固相的射流源设置为面源,设置颗粒的粒径和质量流率,将颗粒设置为惰性粒子,设置其密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$ 。固相入口边界设置为逃逸。定义进口截面颗粒的体积分数和速度均匀分布,固相颗粒相对液相的跟随系数取为 1.0,即在进口边界固、液两相的速度相同。

(3)壁面条件。液相:液相无滑移。固相:壁面为反射壁面,考虑颗粒与壁面的碰撞反射。

2.2 基于离散相模型的电潜泵叶轮磨损分析

数值模拟计算时采用 SIMPLEC 算法进行求解。图 2 为叶轮盖板磨损云图。从图 2 中可以看出,叶轮前盖板除出入口局部磨损剧烈外,其它部位磨损较均匀,靠近吸力面一侧的磨损较严重;后盖板前部分磨

损较严重,后半部分磨损较轻。叶轮前盖板平均磨损率为 $6.28\times10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶轮后盖板平均磨损率为 $9.11\times10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶轮后盖板处的磨损更严重,这与田爱民等^[15]的试验结果比较一致。

图 3 为叶轮叶片磨损云图。从图 3 中可以看出,叶片吸力面磨损分布较广,其叶片头部磨损严重,中部次之,出口处磨损最轻。叶片压力面的磨损主要分布在头部和尾部,中间部分磨损较轻,吸力面和压力面的最大磨损率相差不大,但吸力面的磨损分布范围大,平均磨损率为 $1.46\times10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,压力面平均磨损率为 $4.36\times10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶片吸力面磨损更严重。

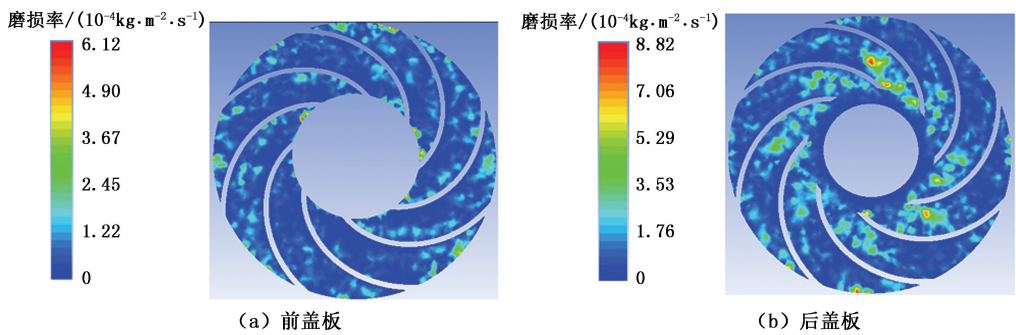


图 2 叶轮盖板磨损云图
Fig. 2 Wear contour of impeller cover plate

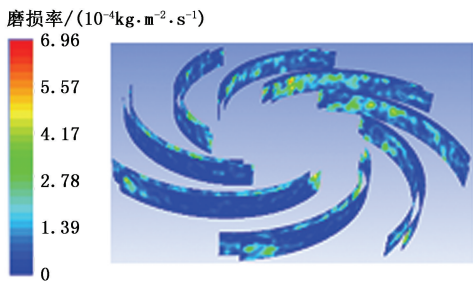


图 3 叶轮叶片磨损云图

Fig. 3 Wear contour of impeller blades

3 工况及结构参数对叶轮磨损影响

叶轮是离心泵的核心部件,为举升钻井液提供能量。叶轮也是离心泵磨损最为严重的部件之一,叶轮壁面磨损会导致叶片失去原有型线导致其效率降低、转子不平衡性增加,从而导致一系列后果。

3.1 工况参数对叶轮磨损影响

3.1.1 砂粒粒径、含砂体积分数的影响

实际工作中一般要求电潜泵井的含砂体积分数不得超过 0.05%,但在投产初期含砂体积分数较

高,故选择工况如下:额定排量为 $150\text{ m}^3/\text{d}$,固相进口体积分数分别为 0.03%、0.05%、0.1%,粒径分别为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.08 mm。

在含砂体积分数分别为 0.03%、0.05%、0.1% 时,改变砂粒粒径,计算含砂体积分数与砂粒粒径对离心泵叶轮磨损的影响。从平均磨损率考虑计算不同砂粒体积分数下叶轮平均磨损率随砂粒粒径的变化曲线,如图 4 所示。

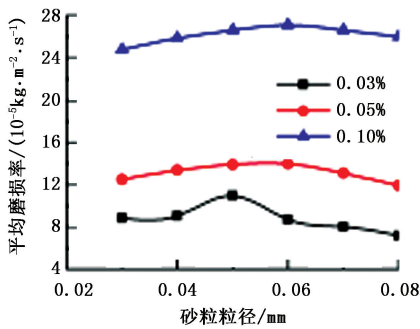


图 4 不同砂粒体积分数下叶轮平均磨损率随砂粒粒径的变化

Fig. 4 Average wear rate changes under different particle size and volume fraction

从图 4 可以看出,砂粒进口体积分数越高,磨损率越高。在砂粒进口体积分数一定时,随着粒径的增加,叶轮的磨损率呈现先增加后降低的趋势,且不同体积分数下平均磨损率最大值的位置不同。砂粒进口体积分数为 0.03% 时,最大值出现在粒径 0.05 mm 处,砂粒进口体积分数为 0.05%、0.1% 时,最大值出现在粒径 0.06 mm 处。出现这些现象的原因是在一定的砂粒进口体积分数下,随着粒径的增加,虽然单个颗粒的质量增加但是颗粒数量降低,从而与叶轮壁面发生碰撞的次数降低,在撞击叶片壁面颗粒次数和质量的综合影响下,叶轮的磨损率呈现先增加后降低的趋势。同时从图 4 中可以看出,在砂粒粒径一定时,随着砂粒体积分数增加,叶轮磨损率增大。

3.1.2 泵转速对叶轮磨损的影响

固相进口体积分数为 0.05%,粒径为 0.05 mm 时分析不同转速对叶轮磨损率的影响,见图 5。从图 5 中可以看出,随着叶轮转速的提高,平均磨损率增大,因此可以适度降低叶轮转速,从而降低磨损。

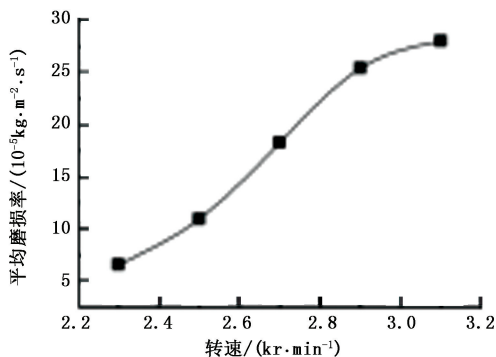


图 5 叶轮平均磨损率随转速的变化

Fig. 5 Changes of average wear rate under different rotational speed

3.2 结构参数对叶轮磨损影响

3.2.1 叶轮叶片进口角的影响

选取叶片出口安放角 β_2 为 21° ,叶片进口安放角 β_1 分别为 26° 、 29° 、 32° 、 35° 、 38° 、 41° ,含砂体积分数为 0.03%,固体砂粒为 0.05 mm,研究叶片进口安放角对潜油离心泵磨损的影响。图 6 为不同叶片进口角下叶轮各部分平均磨损率。

从图 6 中可以看出,叶片出口角 $\beta_2 = 21^\circ$ 时,随着叶片进口角的增加,前盖板的最大磨损速率不断降低,但下降速度越来越平缓;后盖板最大磨损速率呈线性下降趋势;当 $\beta_1 < 32^\circ$,前盖板的最大磨损速

率大于后盖板的最大磨损速率;当 $\beta_1 > 32^\circ$,前盖板的最大磨损速率小于后盖板的最大磨损速率。随着叶片进口角的增加,吸力面最大磨损速率上下波动,在 $\beta_1 = 41^\circ$ 处,快速下降,达到最小值;压力面最大磨损速率整体呈下降趋势,但下降缓慢;吸力面最大磨损速率均大于压力面。对叶轮整体最大磨损速率而言,其随着叶片出口角的增加而不断降低。综上所述,在叶片进口角 $\beta_2 = 21^\circ$ 下,随着叶片出口角的增加,叶轮最大磨损速率呈下降趋势,故设计时应选取较大的叶片进口安放角。

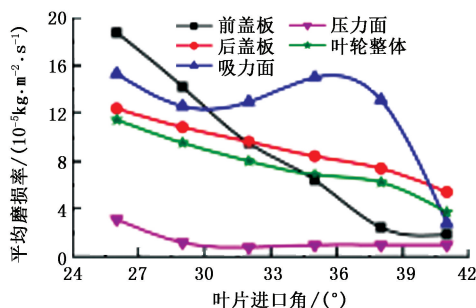


图 6 不同叶片进口角下叶轮各部分平均磨损率

Fig. 6 Average wear rate under different inlet angle

3.2.2 叶轮叶片出口角的影响

选取叶片进口安放角 β_1 为 38° ,叶片进口安放角 β_2 分别为 18° 、 21° 、 24° 、 27° 、 30° 、 33° ,含砂体积分数为 0.03%,固体砂粒为 0.05 mm,研究叶片出口安放角对潜油离心泵磨损的影响。图 7 为不同叶片出口角下叶轮各部分平均磨损率。

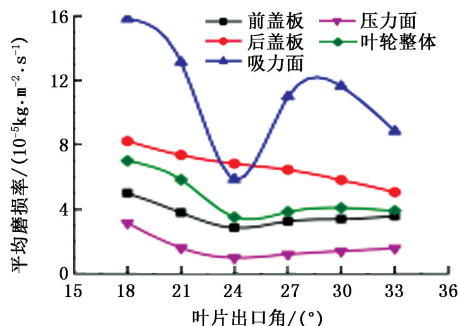


图 7 不同叶片出口角下叶轮各部分平均磨损率

Fig. 7 Average wear rate under different outlet angle

从图 7 中可以看出,在叶片进口角 $\beta_1 = 38^\circ$ 时,随着叶片出口角的增加,前盖板的平均磨损率先下降后上升,但上升幅度不大;后盖板的平均磨损率不断降低,后盖板的平均磨损率均大于前盖板。吸力面平均磨损率先下降后上升再下降,压力面平均磨损率先下降后上升,两者均在 $\beta_2 = 24^\circ$ 时最低。由此可知设计叶片出口角不宜过大或者过小。

4 结 论

(1)叶片吸力面磨损分布较广,叶片吸力面头部至中部、压力面入口和出口处磨损严重,在叶片吸力面增加防护涂层,可达到降低冲蚀磨损的效果。

(2)随着砂粒体积分数升高及叶轮转速的增大,叶轮磨损率增大;砂粒体积分数相同时,随着粒径的增加,颗粒质量增加,数量减少,叶轮磨损速率先升高后降低。

(3)叶轮平均磨损率随着进口安放角的增加而降低,随着出口安放角的增加先增加后降低,设计时叶片进口安放角应取较大值,叶片出口安放角不应过大或过小。

参考文献:

- [1] PAGALTHIVARTHI K V, DESAI P V, ADDIE G R. Particulate motion and concentration fields in centrifugal slurry pumps[J]. Particulate Science and Technology, 1990,8(1/2):77-96.
- [2] WALKER C I, WELLS P J, BODKIN G C. The effect of flow rate and solid particle size on the wear of centrifugal slurry pumps[J]. Liquid-Solid Flows, 1994,18:189-195.
- [3] KHALID Y A, SAPUAN S M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2007,59(1):18-28.
- [4] 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):54-59.
- [5] 黄思,王朋,区国惟,等. 多级多出口离心泵的数值模拟及试验验证[J]. 流体机械,2013,41(1):10-13.
- HUANG Si, WANG Peng, OU Guowei, et al. Numerical simulation and experimental verification of multistage and multoutlet centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2013,41(1):10-13.
- [6] 陈思,王尊策,吕凤霞,等. 基于离散相模型的电潜泵叶轮磨损数值计算[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):143-148.
- CHEN Si, WANG Zunce, LÜ Fengxia, et al. Numerical calculation of particle erosion within electric submersible pump based on discrete phase model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(3):143-148.
- [7] 王尊策,梅思杰,陈思,等. 电潜泵叶轮冲蚀磨损的数

值模拟及验证[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014,36(4):175-181.

WANG Zunce, MEI Sijie, CHEN Si, et al. Numerical simulation and verification of particle impact erosion within electric submersible pump[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014,36(4):175-181.

- [8] 宋健斐,魏耀东,时铭显. 旋风分离器内颗粒体积分数场的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008,32(1):90-94.

SONG Jianfei, WEI Yaodong, SHI Mingxian. Numerical simulation on particle concentration distribution in cyclone separator[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(1):90-94.

- [9] 赵新学,金有海,孟玉青,等. 旋风分离器壁面磨损的数值分析[J]. 流体机械,2010,38(4):18-22.

ZHAO Xinxue, JIN Youhai, MENG Yuqing, et al. Numerical analysis on the erosion of cyclone separator's surface wall[J]. Fluid Machinery, 2010,38(4):18-22.

- [10] 赵新学,金有海. 排尘口直径对旋风分离器壁面磨损影响的数值模拟[J]. 机械工程学报,2012,48(6):142-148.

ZHAO Xinxue, JIN Youhai. Effect of dust discharge diameter on wall erosion in cyclone separator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(6):142-148.

- [11] 王伟生,卢卫群,纪烈勇,等. 基于DPM模型的立磨局部流场数值模拟分析[J]. 机械设计,2014,31(11):68-72.

WANG Weisheng, LU Weiqun, JI Lieyong, et al. Numerical simulation of local flow field in the vertical roller mill base on DPM model[J]. Journal of Machine Design, 2014,31(11):68-72.

- [12] 王福军. 计算流体力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:113-125.

- [13] FINNIE I, MCFADDEN D H. On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence [J]. Wear, 1978,48(1):181-190.

- [14] ANSYS. ANSYS fluent theory guide[M]. Canonsburg PA: ANSYS Inc, 2013:424-425.

- [15] 田爱民,田爱杰,许洪元,等. 离心泵叶轮内磨损规律的试验研究[J]. 煤炭科学技术,1998,26(11):43-46.
- TIAN Aimin, TIAN Aijie, XU Hongyuan, et al. The experimental research on erosion of the centrifugal pump impeller[J]. Coal Science and Technology, 1998,26(11):43-46.

(编辑 沈玉英)