脱硫泵固液两相流动的数值模拟与磨损特性

李 昳[1]，何伟强[1]，朱祖超[1]，张玉良[2]，崔宝玲[1]
(1.浙江理工大学 机械与自动控制学院，浙江 杭州 310018；2.浙江大学 机械与能源工程学院，浙江 杭州 310027)

摘 要：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.结果表明，不同直径的固体颗粒在叶片压力面上的体积浓度均比吸力面上高，其浓度随颗粒直径增加而增加；在蜗壳中，颗粒主要分布在蜗壳近壁处，并随颗粒直径增大而浓度增加.其相对速度矢量方向基本沿叶片表面，与叶片相切，因此在叶片上主要发生滑动磨损；固体颗粒以较小角度与蜗壳壁面相碰撞，随颗粒直径增大，角度略有增加，在离心力的作用下，固体颗粒以较大径向速度挤压蜗壳壁面，并沿蜗壳周壁向出口运动，导致蜗壳发生严重滑动磨损；颗粒在蜗壳隔舌附近的运动比较紊乱，导致在隔舌部位主要发生冲击磨损.数值模拟结果与实际磨损情况比较吻合，表明所采用的计算方法是可行的.

关键词：脱硫泵；固液两相流；数值模拟；磨损；特性
中图分类号：TH311 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)02-0124-05

Numerical simulation of solid-Liquid two-phase flow and abrasion characteristics in desulfurization pump

LI Yi[1], *HE Weiqiang*[1], *Zhu Zuchao*[1], *Zhang Yuliang*[2], *Cui Baoling*[1]
(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Particle concentration distribution, velocity distribution and abrasion characteristics were studied by using numerical simulation of the solid-liquid two-phase flow in a desulfurization pump. The volume fraction of solid particles along the blade pressure sides is higher than the suction sides and increases when the particle diameter increases. Particles in the volute are mainly distributed near the wall. The volume fraction increases with the increase of particle diameter. The relative-velocity vector direction is basically along the blade surface. This indicates that it's the sliding wear in the blades. Particles collide with the volute wall with a small angle. The angle increases with the increase of the particle diameter. Solid particles move to the volute outlet along walls while they extrude the walls by the effect of centrifugal force. So serious abrasion appears in the volute. The particles moving track is disorder near the position of volute tongue. The impact wear occurs near the tongue region. Numerical simulation results are consistent with the actual situation. It follows that the calculating method is feasible.

Key words: desulfurization pump; solid-liquid two-phase flow; numerical simulation; abrasion; characteristic

收稿日期：2009-02-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50609025,50879080)；浙江省科技计划项目(2008C21023,2008C01024-1)
作者简介：李 昳(1973—)，女，重庆铜梁人，讲师(liyi@zstu.edu.cn)，主要从事固液两相流泵的理论与应用研究.
何伟强(1984—)，男，浙江金华人，硕士研究生(heweiqiang123@163.com)，主要从事固液两相流泵内部流场的研究.

万方数据

随着经济发展，煤炭消耗量逐年增加. 二氧化硫排放量呈逐年增加之势，这是降水呈酸性的主要原因，故电厂及相关化工企业烟气脱硫就变得十分紧迫. 其中湿法脱硫技术效率高，适用煤种范围宽，是我国脱硫所采用的主流工艺. 而泵在湿法脱硫装置中的应用是很广泛的，包括石灰石浆供给泵、石膏尾浆输送泵或排出泵、吸收剂制备泵、吸收塔循环泵等.

因为输送介质种类繁多，要求脱硫泵具有良好的耐腐蚀、耐磨损性能，脱硫泵目前基本上还是采用常规的清水泵设计方法加以修正来进行设计，未能从其内部流动来分析磨损特性并建立相应的设计方法. 为了设计出高质量的脱硫泵，就必须了解泵内的流动和磨损规律，以解决以上技术难题.

随着 CFD 技术的发展，许多研究者采用数值方法对固液两相流进行模拟，文献[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，采用拉格朗日逼进法模拟颗粒相，在流体相动量方程中处理颗粒与流体之间的动量交换，文献[3]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对含狭长颗粒两相流进行了数值模拟，并与 DPIV 试验结果进行对比，表明其流场与球形颗粒类似，文献[4]考虑不同颗粒尺寸、流速、流道弯曲程度的影响，采用欧拉－拉格朗日耦合方法对二维固液两相管流进行了数值模拟. 但上述文献均是针对两相管流进行研究，文献[5]分析了颗粒直径以及初始固相浓度对渣浆泵叶轮和蜗壳磨损的影响，得出其叶轮与蜗壳内的速度分布、固相浓度分布以及旋涡结构等流场信息. 文献[6]对旋流泵内氯化钠盐析两相流场进行研究，发现在整个流道内，盐析晶体颗粒大部分均匀分布于无叶腔，进入叶轮后向叶片工作面靠拢，颗粒浓度最低处是在叶轮进口叶片背面，靠近叶轮后盖板附近，液固两相在叶轮与无叶腔中的周向速度分布差异明显，两相间速度及脉动速度有滑移，但总体差异不显著. 由于这类泵所输送介质一般为固液两相甚至多相流，固体颗粒在泵内的运行规律比较复杂，而且其中所含颗粒的大小、密度、硬度性质不尽相同，流动的复杂程度相比单相流动大大增加，所以许多研究者的结论不完全相同.

笔者在前人的基础上，基于三维流动分析，模拟脱硫泵内固液两相流动，并对流道内颗粒浓度分布、速度分布及磨损特性进行研究.

1　控制方程

将颗粒与流体作为在宏观上占据同一空间而相互渗透的各相，采用 N－S 方程进行模拟.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j v_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_e\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right)\right] + \Delta\rho g_i + \sum \frac{\rho_p(v_{pi} - v_i)}{\tau_{rp}} + v_i S + F_{Mi}$$

流体相采用 $k-\varepsilon$ 模型方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - \rho\varepsilon + G_p$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{\varepsilon}{k}[c_1(G_k + G_p) - c_2\rho\varepsilon]$$

颗粒相采用代数 A_p 模型

$$\frac{v_p}{v_t} = \frac{k_p}{k} = \left(1 + \frac{\tau_{rp}}{\tau_t}\right)^{-1}$$

式中 G_k 为湍动能产生项，$G_k = \mu_t\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$；$G_p$ 为颗粒湍能与流体湍能相互作用造成的湍能产生项，$G_p = -\sum_i \frac{\rho_p}{\tau_{rp}}\left[2(k - c_p^k\sqrt{kk_p}) + v_i\frac{v_p}{\sigma_p n_p}\frac{\partial n_p}{\partial x_i}\right]$；其中 $c_\mu = 0.09$，$c_1 = 1.44$，$c_2 = 1.92$，$c_p^k = 0.75$，$\sigma_k = 1$，$\sigma_\varepsilon = 1.33$，$\sigma_p = 0.7$.

2　脱硫泵几何参数与边界条件

流量为 557 m^3/h，扬程为 26 m，转速为 980 r/min. 叶轮的主要几何参数：叶片数 $Z = 4$ 枚，叶片出口宽度 $b_2 = 64$ mm，叶轮轮毂 $d_h = 125$ mm，颈部直径 $D_n = 210$ mm，出口直径 $D_2 = 420$ mm. 固相的流动参数：体积浓度 5%，材料密度 $\rho_p = 1\ 140$ kg/m^3.

为了减小进出口对计算区域的影响，适当延伸求解区域. 由质量守恒及进口无旋条件确定流速，假定出口边界处流动已充分发展，固壁表面上的流速无滑移，压力取第二类边界条件，在近壁区采用壁面函数法进行计算. 计算过程中，不考虑颗粒间碰撞及颗粒撞击壁面后的破碎现象.

3　数值模拟结果

3.1　网格生成

采用非结构化网格技术对计算区域进行网格划分，网格总数为 984 462，网格图见图 1.

万方数据



图1 计算区域网格图
Fig. 1 Grid of calculation region

3.2 计算结果与分析

3.2.1 固体颗粒在流道内的分布情况

直径分别为 $d_1=0.1$ mm，$d_2=0.5$ mm，$d_3=1$ mm 的固体颗粒在流道内的体积浓度分布情况见图2.

在叶轮流道中，3 种直径颗粒均是在叶片压力面上体积浓度较大，在吸力面上分布较少[7,8]. 而颗粒直径越大，进口附近的体积浓度越大，磨损严重的部分是叶片出口处及叶轮头部，这与实际磨损情况是吻合的.

在蜗壳中，颗粒体积浓度在壁面附近较大，这主要是由于离心力的作用导致颗粒沉积. 随着半径增加，颗粒直径越大，其浓度分布越大，因为直径越大，其离心力就越大. 蜗壳壁面上的颗粒沉积层对壁面产生一定滑动磨蚀，由于离心力作用，颗粒以较大的径向速度挤压到蜗壳周壁，并沿着蜗壳周壁向泵体出口运动，对蜗壳周壁产生切削滑动，这种类型磨损会使蜗壳磨穿. 由大颗粒的分布还可以清晰看出，隔舌附近部位处颗粒体积浓度也较大，这也是实际磨损较为严重的部位.

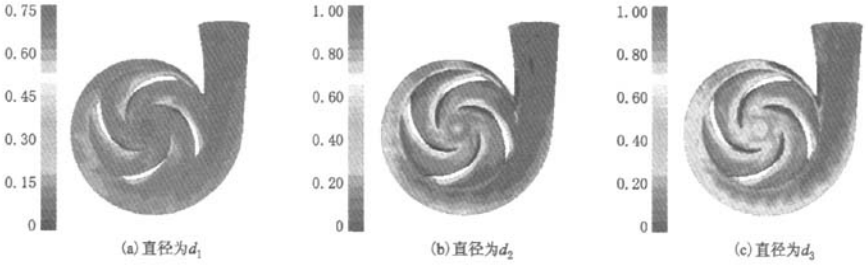


图2 不同直径颗粒在流道内体积浓度分布
Fig. 2 Volume Fraction of different diameter particles in flow channel

3.2.2 固体颗粒在叶片压力面上的分布情况

分别考察前盖板、叶高中线截面、后盖板位置处，3 种直径固体颗粒在叶片压力面上的体积浓度分布情况如图 3 所示.

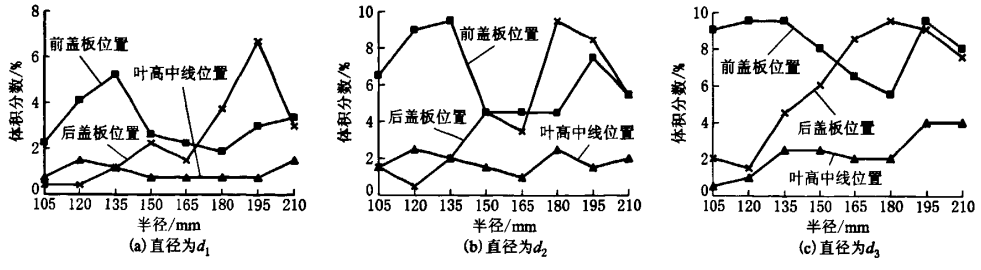


图3 不同直径颗粒沿叶片压力面体积浓度分布
Fig. 3 Volume Fraction of different diameter particles along pressure side

固体颗粒在叶片压力面上体积浓度随颗粒直径及半径变化而变化，由图 3a 可知，颗粒在进口附近半径约 130 mm 位置浓度最大，随后下降，到出口附近有所升高，而且随着颗粒直径增加及浓度增大，颗粒直径为 d_3 时，前盖板出口附近其体积分数达到 9.50%，接近平均浓度的 2 倍. 由图 3b 可知，在该位置处，颗粒浓度沿整个叶轮流道普遍较低，半径最大处浓度最大. 由图 3c 后盖板处可知，颗粒在出口附近半径约 200 mm 位置浓度最大，直径为 d_1 的颗粒体积分数达到 6.69%，直径为 d_2 和 d_3 的颗粒体积分数均达到 9.50%. 即颗粒沉积层沿着压力面从进口到出口，并逐渐扩散到整个叶轮宽度，这正是在实

万方数据

际运行中所发现的主要磨损区域.

3.2.3　固体颗粒沿壁面处的运动轨迹情况

3种直径固体颗粒在叶片位置处的相对速度矢量如图4所示，其中图4a～4c为叶轮内部颗粒相对速度矢量总图，图4d～4f为叶片中部局部放大图. 由图4a～4c可知，在叶轮内部，固体颗粒的相对速度矢量方向基本沿叶片表面，与叶片相切，与颗粒直径关系不大. 固体颗粒沿叶片壁面运动，导致叶片表面主要发生滑动磨损，严重者甚至有清晰沟槽划痕存在.

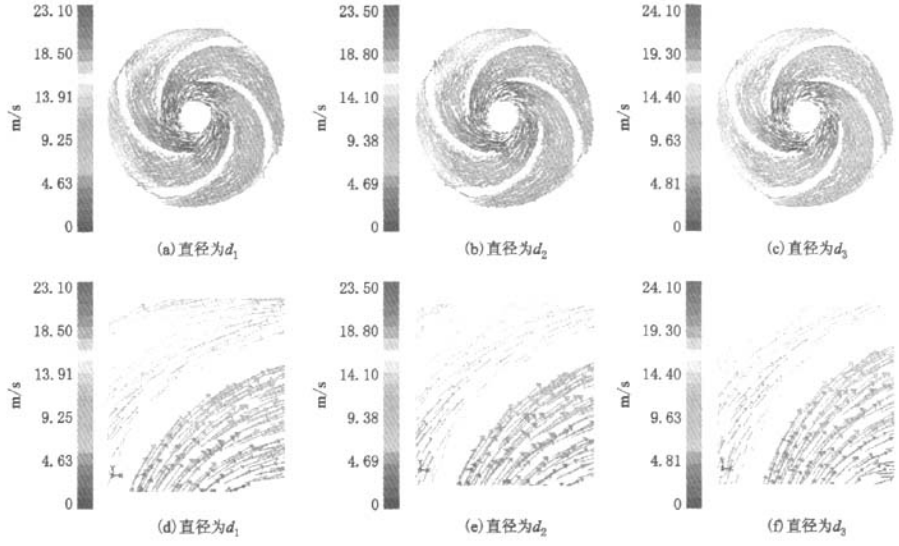
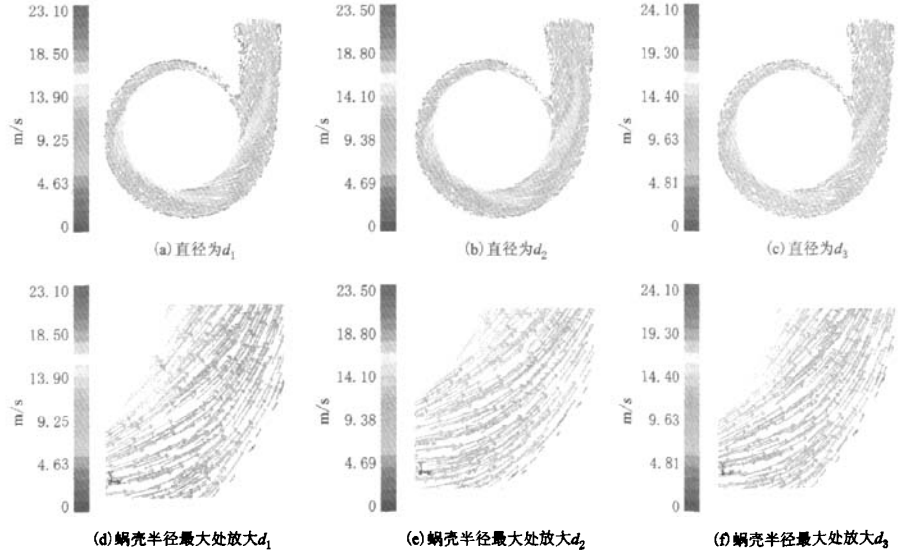


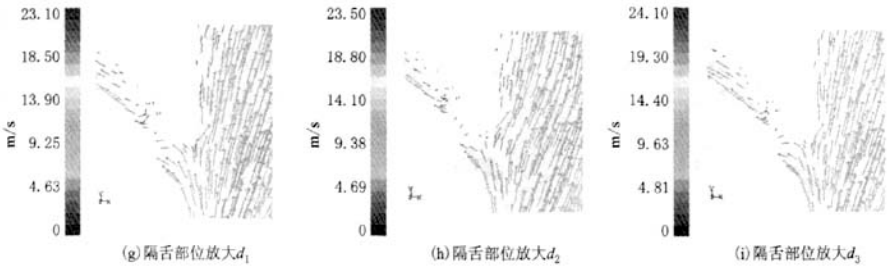
图4　不同直径颗粒叶轮内相对速度矢量图

Fig. 4　Relative-velocity vectors of different diameter particles in impeller

3种直径固体颗粒在蜗壳壁面处的绝对速度矢量如图5所示，，其中图5a～5c为蜗壳内部颗粒绝对速度矢量总图，图5d～5f为蜗壳半径最大处局部放大图，图5g～5i为隔舌部位局部放大图. 由图5a～5f可知，在蜗壳内部，固体颗粒以较小的角度与蜗壳壁面相碰撞，随着颗粒直径增大和蜗壳半径增加，碰撞角度均略有增加，磨损最严重的位置即发生在半径最大处. 因为有径向速度存在，离心力使得固体颗粒压在蜗壳壁面上，并沿着蜗壳周壁向出口运动，导致蜗壳壁面发生较为严重的磨损.



万方数据



(g)隔舌部位放大d_1 (h)隔舌部位放大d_2 (i)隔舌部位放大d_3

图5 不同直径颗粒蜗壳内绝对速度矢量图

Fig. 5 Velocity vectors of different diameter particles in volute

随着颗粒直径增加,发生冲击磨损的比例增加.由图5g~5i可知,隔舌附近的固体颗粒运动比较紊乱,导致隔舌发生冲击磨损.

4 结 论

1)固体颗粒在叶片压力面的体积浓度大于在吸力面的体积浓度,且其浓度随着颗粒直径增加而增加.

2)固体颗粒在叶片压力面上的分布为进口附近前盖板位置的浓度最大,在出口附近则是后盖板位置处的浓度最大.

3)固体颗粒在蜗壳中的分布为体积浓度在蜗壳壁面外圆周较大,随着半径的增加,颗粒直径越大,其浓度分布越大.

4)固体颗粒的相对速度矢量方向基本沿叶片表面,与叶片相切,与颗粒直径关系不大.

5)固体颗粒以较小的角度与蜗壳壁面相碰撞,随颗粒直径增大,角度略有增加,在蜗壳隔舌附近的运动比较紊乱.

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] Long Fan, Zaisha Mao, Yundong Wang. Numerical simulation of turbulent solid-liquid two-phase flow and orientation of slender particles in a stirred tank[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(24): 7045-7056.

[4] Hui Gao, Liejin Guo, Ximin Zhang. Liquid-solid separation phenomena of two-phase turbulent flow in curved pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(24): 4995-5005.

[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] 杨敏官,高 波,李 辉,等. 旋流泵内盐析两相流场的计算及试验研究[J]. 机械工程学报,2008,44(12): 42-48.
Yang Minguan, Gao Bo, Li Hui, et al. Simulation and experimental research on salt-out two-phase flow field in a vortex pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 42-48. (in Chinese)

[7] 杨敏官,刘 栋,贾卫东,等. 离心泵叶轮内部三维湍流流动的分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6): 524-527.
Yang Minguan, Liu Dong, Jia Weidong, et al. Analysis on turbulent flow in impeller of centrifugal pump[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2006, 27(6): 524-527. (in Chinese)

[8] 高 波. 旋流泵液固两相流场的计算及PDPA实验研究[D]. 江苏:江苏大学,2007.

(责任编辑 贾国方)

万方数据