

螺旋离心泵固液两相流中的叶轮磨损分析

李仁年, 赵文杰, 李琪飞

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 螺旋离心泵运送固液两相流介质造成叶轮磨损的问题较复杂, 以模型泵为研究对象建立三维模型, 利用 FLUENT 软件对其内部三维流动进行固液两相流数值模拟分析, 用清水试验验证数值模拟计算的合理性. 分别计算了不同固相体积分数下叶轮工作面的速度分布以及固相浓度在叶轮中的分布, 并根据两相流中固相体积分数与叶轮的相对速度分布分析了叶轮的磨损. 数值模拟结果表明: 在螺旋离心泵的离心段, 相对速度与固相浓度达到较大值, 该段易产生磨损.

关键词: 螺旋离心泵; 固液两相流; 数值模拟; 叶轮磨损

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0366(2014)01-0067-04

20 世纪 60 年代, 瑞士 Sthale^[1] 发明了装有螺旋型叶轮的螺旋式离心泵并用于港口输送活鱼. 因它将螺杆泵与离心泵的优点融合, 充分发挥了两者的优势, 到 20 世纪 80 年代初, 已有 2 000 多台螺旋离心泵在世界各大渔港的输送系统中投入使用.

螺旋离心泵不仅能够安全可靠稳定地运行, 而且其效率也是普通离心式杂质泵和旋流式杂质泵难以比拟的. 早期国内引进此泵后, 主要应用于造纸, 海藻化工和捕捞行业. 随着无堵塞泵理论研究的进展与应用领域的不断拓展, 螺旋离心泵已广泛用于输送蔬菜、水果、低中浓纸浆、绒状物、含泥沙水及其他含高浓度杂质的浆液等, 并且突破了杂质泵的使用范围, 在航空航天领域也发挥了一定作用^[2,3].

到目前为止, 螺旋离心泵在设计、加工制造和特性研究等方面, 都远没有达到普通离心泵的水平, 水泵领域的很多研究方法在螺旋离心泵的研究中还很少涉及. 多年来, 国内外相关学者对螺旋离心泵性能的关系进行了诸多数值模拟统计与归纳, 总结出了很多经验用于螺旋型叶轮的设计^[4].

对于螺旋离心泵的叶轮磨损问题, 许多学者也做了相关的研究, 如关于螺旋离心泵的固液两相流中固相颗粒粒径大小与体积浓度在叶轮中的分布等对螺旋离心泵叶轮的磨损情况. 王秋红等^[5]认为, 随着颗粒体积分数的变化, 流体特性如颗粒浓度分布、流体扬程等也发生变化, 所以应按照颗粒的粒径范围和体积分数来设计叶片型线, 从而提高叶轮的使用

寿命. 韩伟等^[6]在小粒径固液两相流在螺旋离心泵内运动的数值分析中得出固相粒径的大小以及固相进口初始体积分数的大小对螺旋离心泵的内流及扬程有影响. 但对于螺旋离心泵内叶轮内流情况中速度与磨损方面的研究, 在相关文献中很少涉及.

1 三维造型及数值模拟方法

1.1 三维造型及网格划分

采用 150×100 LN-32 型螺旋浓浆泵作为模型泵, 以清水、含沙水为介质, 利用 CFD 方法^[7], 对其内部流动进行计算分析, 通过对比分析清水及固液两相流介质在螺旋离心泵内部的流动情况及速度, 为改善叶轮的性能提供了有益的参考.

所研究泵的设计参数分别为流量 $Q=165 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=32 \text{ m}$, 转速 $n=1\,480 \text{ r}/\text{min}$. 设定介质为清水与固液两相流. 建立模型如图 1 所示.

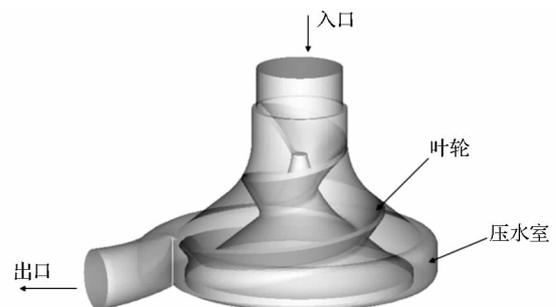


图 1 螺旋离心泵三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of screw centrifugal pump

收稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079066)

作者简介: 李仁年(1963-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博导, 研究方向为流体机械理论及其应用. E-mail: lirn@lut. cn

对各计算区域划分网格为非结构四面体网格, 网格单元总数为 562 508. 并对网格进行相关性检查. 各部件网格单元划分如图 2 所示.



图 2 螺旋离心泵各部件网格划分

Fig. 2 Mash of each part in screw centrifugal pump

采用自由出流. 控制方程采用标准 $k-\epsilon$ 模型.

为了验证模型的可靠性, 首先用清水进行数值模拟. 对于清水的计算, 采用隐式、分离、稳态计算方法. 计算域的进口采用稳态、沿轴向的速度进口条件. 湍流动能、湍流耗散项和动量方程采用一阶迎风格式离散, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法. 对于固液两相流的计算, 采用了 Mixture 固液两相流模型进行求解. 分别计算了相同粒径、3 种不同初始固相浓度下的固液两相流流场, 为了更好的显示结果, 假定固液两相之间无相对滑移, 颗粒与叶轮表面发生的撞击磨损也较小^[8]. 选用与清水相跟随性较好的球形颗粒, 粒径为 0.076 mm, 密度为 2 650 kg/m³. 初始固相的颗粒体积分数为 $\varphi=5\%$, $\varphi=10\%$, $\varphi=20\%$.

1.3 工作特性曲线

计算出螺旋离心泵在清水介质下的各工况点的扬程和效率, 可绘制出该螺旋离心泵模型在不同流量与扬程效率的工作特性曲线, 并与实验值进行比较, 如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 计算结果与试验值吻合较好; 设计工况扬程的误差不超过 5%; 效率的误差不超过 3%, 且计算效率低于试验数值; 小流量工况时, 计算扬程和计算效率误差有明显增大的趋势, 但从

1.2 数值模拟方法的选取

对于螺旋离心泵边界条件的设置, 各壁面采用无滑移壁面条件, 进口边界条件采用速度进口, 出口

0.4~1.4 倍设计流量工况时, 计算扬程的最大误差均不超过 8%, 计算效率的最大误差均不超过 5%.

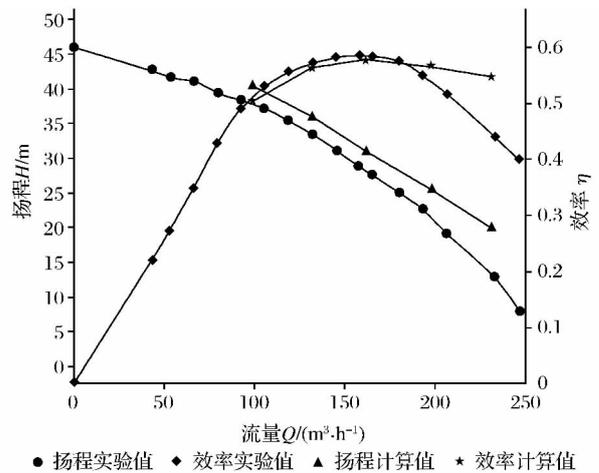


图 3 计算数据与实验结果比较

Fig. 3 Calculated data compared with the experimental results

2 数值模拟分析

2.1 清水工况

螺旋离心泵叶轮在工作介质为清水的设计流量下. 工作面与背面速度分布见图 4.

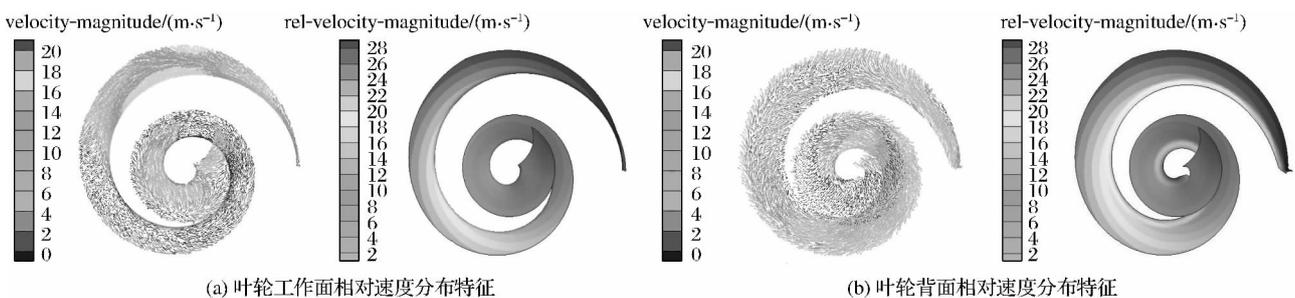


图 4 设计流量下叶轮工作面与背面的相对速度分布特征

Fig. 4 The relative speed of the working face and the back of vane at design flow

从图 4 中可以看出,叶轮工作面与背面的相对速度分布大致相同,但在叶轮同一位置工作面的相对速度较叶轮背面的大,且在同一包角角度轮毂侧的水流速度明显小于轮缘侧的速度.整体来看,相对速度从进口由于方向改变而变小,而后逐渐增大,到叶轮最大半径处速度达到最大值,而后相对速度随着叶轮半径的减小而减小.

2.2 不同固相浓度两相流工况

螺旋离心泵叶轮在不同固相浓度的叶轮工作面的相对速度分布见图 5.从图 5 可以看出,在不同固相浓度下的叶轮工作面的相对速度分布大致相同,在叶轮螺旋前半段速度较大,但随着叶轮的半径增大,速度变小.而在离心段,相对速度比螺旋段大,在最大半径处速度达到最大值.而后随着叶轮半径的减小,速度也随之减小.对于不同固相

体积浓度叶轮工作面的相对速度分布,随着进口固相体积浓度的增大,相对速度在叶轮中同一位置逐渐变小,相对速度最大的区域在叶轮最大半径附近.

各固相浓度下叶轮工作面的固体浓度分布如图 6 所示,叶轮工作面的固相浓度随着进口初始浓度的增大而增大,在 5% 的含沙水中,进口端轮缘侧固体浓度分布较低,随着叶轮半径的增大,固体浓度分布趋于稳定.在 10% 的含沙水中,叶轮进口轮毂端固相浓度较大,随后分布较为均匀,靠近离心段的轮毂侧以及离心段的固相浓度分布较叶轮其他位置大,在流道的大部分区域,固相浓度分布比较均匀.而在 20% 的含沙水中,叶轮进口端的轮缘侧固相浓度分布相对较低,而后逐渐均匀,在叶轮的离心段固体浓度达到较高的值.

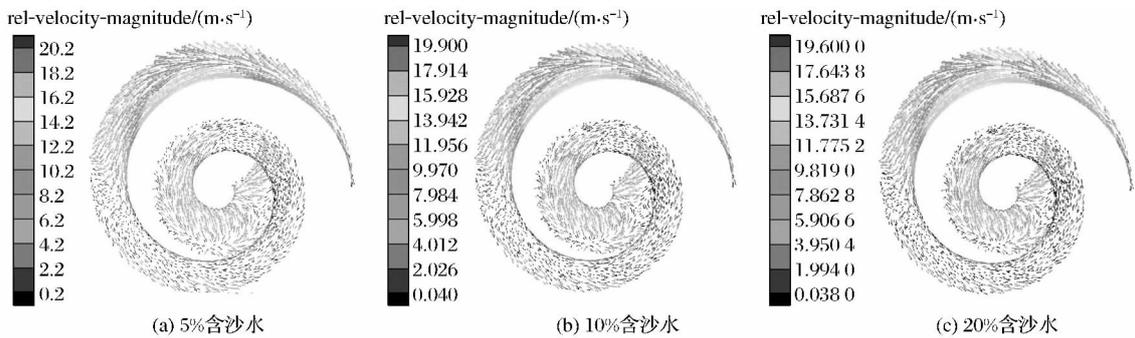


图 5 各固相体积浓度下叶轮工作面的相对速度分布特征

Fig. 5 The relative speed distribution of the solid volume concentration in working face of the vane at different solid phase concentrations

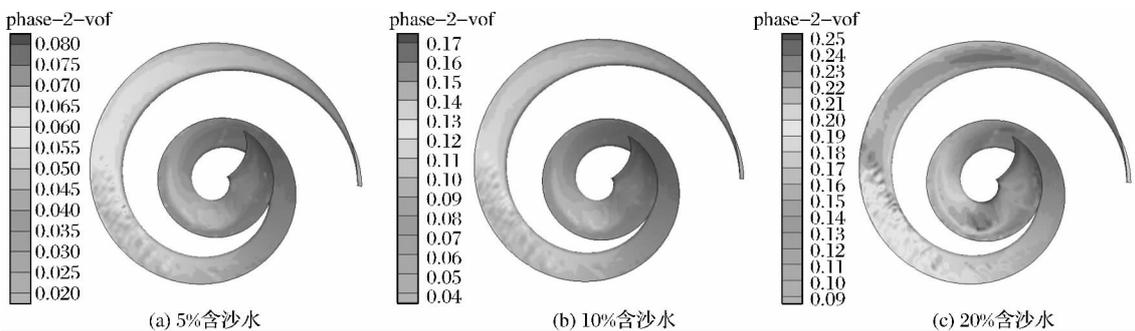


图 6 各固相浓度下叶轮工作面的固体浓度分布

Fig. 6 The solid concentration distribution of the working face at different solid phase concentrations

2.3 综合分析

从清水的计算结果可以看出,叶轮工作面相对速度整体比背面要大,但对应工作面和背面的速度的分布规律几乎相同,在同一包角角度轮毂侧的水流速度明显小于轮缘侧的速度,总体上速度从叶轮进口到叶轮出口逐渐增大,在最大半径处速度达到

最大值,然后随着叶片半径的减小而减小,最大速度位置均在叶片离心段.

在螺旋离心泵的固液两相流模拟计算中,不同固相浓度的叶轮速度分布规律大致相同,因此可以得出固相浓度的大小对于介质在螺旋离心泵流道内的流动特性几乎没有影响.但随着体积浓度的增大,

速度在叶轮中同一位置的速度逐渐变小. 在同一固相浓度分布下, 叶轮工作面的相对速度在进口段变小, 这是由于两相流的速度在叶轮进口段改变方向而变小. 而后在离心段逐渐变大, 在最大半径处达到最大值, 这是由于相对速度分布随着半径的增大而增大.

在不同固相浓度分布图中, 固相浓度在进口段轮缘侧分布较小, 这是由于两相流在进口处改变流动方向所致, 而后固相浓度逐渐增大, 也在离心段也达到较高值, 这是由于叶轮旋转过程中, 固相颗粒存在较大的径向力, 造成其向较大半径的轮缘侧运动, 故造成轮缘段极易产生磨损.

3 结论

(1) 清水与固液两相流的模拟分析显示, 清水工况下叶轮工作面相对速度整体比背面要大, 轮缘侧的相对速度明显大于轮毂侧, 且相对速度在最大离心段达到最大值. 在两相流工况下, 随着固相体积分数的增大, 在叶轮中同一位置的相对速度逐渐变小. 且在同一浓度下, 相对速度在离心段达到最大值.

(2) 在两相流动中, 叶轮中的相对速度轮缘侧较轮毂侧大, 在离心段达到最大值, 由于相对速度较大造成叶轮容易产生磨损. 而固体颗粒由于径向力影响, 它在轮缘侧的浓度大于轮毂侧的浓度分布, 且

在离心段也达到较高值, 故叶轮轮缘侧以及离心段极易产生磨损.

(3) 在模拟流动中, 由于不同浓度的固相体积分数的变化引起叶轮内速度与固相浓度的变化, 故可结合两相流中固体体积分数与叶轮的速度分布来设计叶片型线与加厚方法, 从而提高叶轮的性能与使用寿命.

参考文献:

- [1] Stahle M, Jackson D. The Development of a Screw Centrifugal Pump for Handling Delicate Solids[J]. World Pumps, 1982, 185:53-55.
- [2] 李仁年, 刘成胜, 王秋红. 影响螺旋离心泵扬程的因素分析[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 53-56.
- [3] 李仁年, 李兵, 韩伟. 螺旋离心泵工作特性理论分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 51-53.
- [4] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [5] 李仁年, 王秋红. 固液两相流对螺旋离心泵流场影响的数值分析[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 51-54.
- [6] 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.
- [7] Rikke K B. Flow in a Centrifugal Pump Impeller at Design and Off-design Conditions-Part II: Large Eddy Simulations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125: 73-83.
- [8] 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.

Analysis of Impeller Abrasion by Liquid-solid Two-phase Medium in Screw Centrifugal Pumps

LI Ren-nian, ZHAO Wen-jie, LI Qi-fei

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The due to the transportation of solid-liquid two-phase flow by the screw centrifugal pump is a relatively complicated issue. With the model pump as the research object the three-dimensional model was established, with the aid of the FLUENT software the numerical simulation analysis of the internal three-dimensional flow of solid-liquid two-phase medium was made, and the water test was done to verify the rationality of the simulation calculation. Calculate the velocity distribution on the impeller surface with different solid volume fractions and the distribution of solid density in the impeller. On the basis of the simulated results, the relative velocity and solid density reach a high value at the centrifugal section of the pump, where the abrasion occurs more easily.

Key words: Screw centrifugal pump; Solid-liquid two-phase flow; Numerical simulation; Impeller abrasion