

## 离心式纸浆泵内部流动的数值模拟

贾晓奇<sup>1</sup>, 崔宝玲<sup>1</sup>, 陈德胜<sup>1</sup>, 黄德山<sup>2</sup>

(1. 浙江理工大学浙江省流体传输技术研究重点实验室, 杭州 310018; 2. 杭州轻工业机电设计研究院, 杭州 310004)

**摘要:** 为研究小流量工况下离心式纸浆泵内部流动特性,采用 Mixture 多相流模型对某一离心式纸浆泵内部流动进行三维不可压两相湍流流动计算,并与清水工况的计算结果进行了比较。对比分析了不同流量工况及介质对泵内流体速度、压力和体积浓度分布的影响,并预测了水力性能。结果显示:纸浆泵叶轮流道内速度变化不均,存在大面积回流;相同介质时,流量越小叶轮流道内部流动越不稳定;相同工况下,清水介质下的流动较两相流时更为稳定;两相流时泵的扬程及效率整体都低于清水介质;纸浆分布局部不均,叶片表面进口处叶根和叶顶部位浓度较大,易造成局部磨损,降低叶轮寿命。

**关键词:** 离心式纸浆泵; 数值模拟; 两相流; 性能预测

**中图分类号:** TH311 **文献标志码:** A

### 0 引言

纸浆泵在造纸工艺流程中有着举足轻重的地位,而中浓浆泵凭借其环保、高效、低能耗的特点已越来越成为研究焦点和发展趋势<sup>[1-2]</sup>。国外对于纸浆泵的研究起步较早,研制的纸浆泵具有较高的性能指标<sup>[3-5]</sup>。国内学者对纸浆泵也开展了相关研究,李红等<sup>[6-8]</sup>综述了低浓纸浆泵的结构原理和性能特点,并采用双流体模型、双方程湍流  $k-\epsilon$  模型对低浓纸浆泵进行了数值模拟及试验研究,证明了少叶片半开式叶轮输送两相流介质的优点所在。陈克复<sup>[1]</sup>、陈奇峰<sup>[9-10]</sup>采用基于有限元法的 CFD 技术,对于中浓纸浆进行了研究,对不同类型的离心式中浓浆泵结构进行了探讨。黄烈群等<sup>[11]</sup>将纸浆简化为固体颗粒/清水均匀混合的两相流介质,对一螺旋式纸浆泵内部流动进行数值模拟,采用 RNG  $k-\epsilon$  模型,入口和出口边界给定湍流参数、水力直径,所得的数值结果与实验值基本一致。但中国在离心式纸浆泵的设计研究方面,由于受到各种因素的限制,其水力部件的设计主要是参考清水泵的设计方法,再

根据浆料特点加以修正,设计时必须依靠大量的经验数据,而设计出来的纸浆泵与国外存在明显的差距,并且对于浓纸浆泵内部流动的研究涉及较少。

离心泵在偏离设计流量工作时,叶轮内的流动状态会变得十分复杂<sup>[12-13]</sup>,特别在小流量工况下,会发生回流,流动不稳定。回流的产生对泵的运行造成诸多不利,同时复杂的流动状态也大大降低了泵性能预测的精度。因此,本文以离心式纸浆泵为研究对象,在小流量工况下,分别以清水和固体颗粒/清水为介质,对纸浆泵内部流动进行数值计算,分析不同流量工况及介质对泵内流体速度、压力分布特性和体积浓度分布的影响,并进行性能预测,以揭示离心式纸浆泵内部流动规律。

### 1 计算模型与数值方法

本文中离心式纸浆泵在输送清水条件时,其主要设计参数有:转速 2 350 r/min,流量 110 m<sup>3</sup>/h,扬程 120 m。模型泵的比转速 56.95,属于低比转速离心泵。模型泵的叶轮为半开式离心叶轮,主要的几何参数如表 1 所示。图 1 为离心式纸浆泵过流部件

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21076198,50976105,51276172)浙江省自然科学基金资助项目(R1100530)

作者简介:贾晓奇(1987-),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要从事流体机械及工程的研究。

通信作者:崔宝玲,电子邮箱:blcui@zstu.edu.cn

的三维造型及网格图,其中蜗壳的形状为环形,叶片的型线为二维型线。

表 1 离心式纸浆泵叶轮主要几何参数

	$b_1/\text{mm}$	$b_2/\text{mm}$	$\beta_1/(\text{°})$	$\beta_2/(\text{°})$	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	叶片数 (Z)
叶轮	36	21	25	25.5	45	180	5

注: $b_1$  为叶片进口宽度, $b_2$  为叶片出口宽度, $\beta_1$  为叶片进口角, $\beta_2$  为叶片出口角, $D_1$  为叶轮进口直径, $D_2$  为叶轮出口直径。

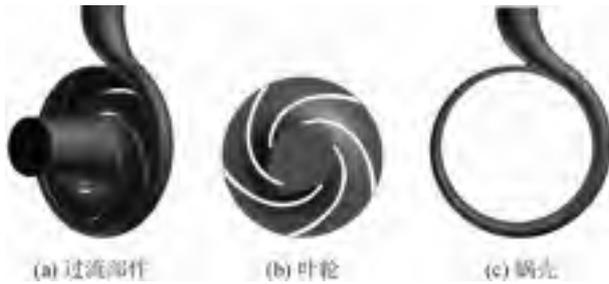


图 1 过流部件三维造型及网格

本文模型泵的计算域包括了从入口到出口是整个流场,其中叶轮和计算域的结构如图 1 所示。应用分块技术获得高质量的网格,其中泵进口及出口段采用结构化的六面体网格,而叶轮和蜗壳采用混合网格方式进行划分,最后得到高质量的四面体与六面体混合网格,网格总数为 66 万。

根据文献[11]以及本人的前期准备工作,本文采用的数值计算方法是可靠的。模型泵计算域的边界条件主要有入口边界、出口边界和壁面边界等。其中,入口采用速度入口条件;出口采用自由出口条件;固壁处采用无滑移、绝热边界条件,近壁区则采用标准壁面函数。本文的计算控制方程为 Navier-Stokes 方程,湍流模型采用了标准  $k-\epsilon$  湍流模型,多相流模型采用 Mixture 模型,使用控制容积法对控制方程进行离散,用 SIMPLE 算法进行速度和压力耦合,对流项采用一阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式。

中浓纸浆悬浮液具有独特的流变性能及较高的气体含量,而在高剪切场内会达到湍流状态,纸浆中的绝大部分气体被分离出来,其流动特性与水类似,此时可将中浓纸浆近似看成一般的固液两相流。本文中,纸浆在湍流发生器的高剪切力作用下充分湍流化后,进入纸浆泵被输送,因此,本文将纸浆简化为固体颗粒和清水混合的两相流介质,为实现流道内两相流的数值计算,假设:清水为主相,固相为固体颗粒且全部为单一同种颗粒;流体相、固相均为连续不可压,且各相物性为常数;固相为球形,粒径均为 0.5 mm 并与水均匀混合且无相变。

## 2 设计点下的计算结果与分析

针对图 1 所示结构的离心式纸浆泵,采用清水为介质进行模拟。同时,在以清水为介质进行计算的基础上,对模型泵进行两相流计算,其中纸浆颗粒相与水的相对密度为 1,动力粘度  $\nu$  为  $4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,体积浓度为 10%。

图 2 为模型泵在清水介质和两相流介质下的性能曲线。图 3 为两种不同介质下模型泵在设计工况点的叶轮中间流道相对速度流线图。为方便后续分析说明,对模型泵的叶轮进行如图 3 中的编号,同时对流道进行编号,叶片 1 与叶片 2 之间为流道 1,按逆时针方向依次为流道 1~5。

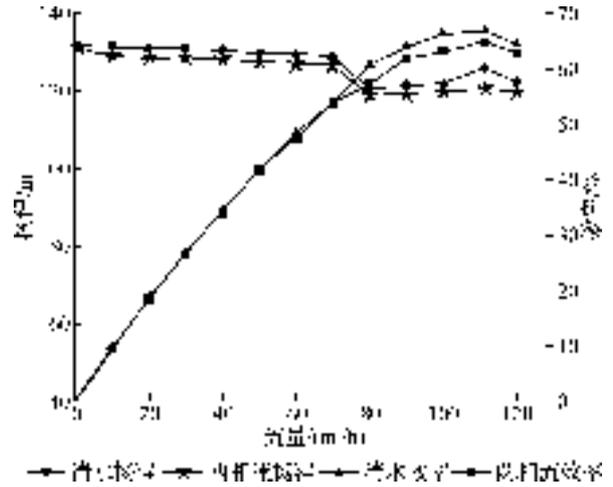


图 2 纸浆泵性能曲线

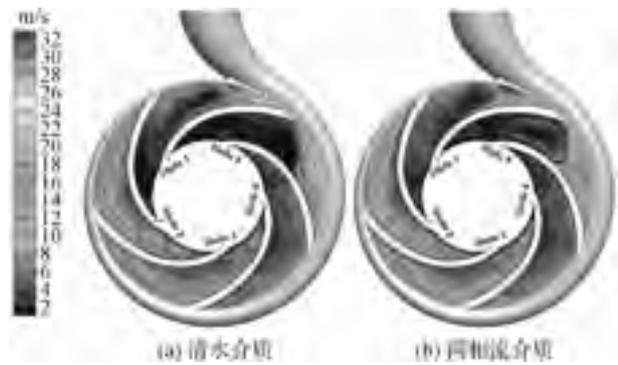


图 3 设计工况下相对速度流线分布

由图 2 可见,两种介质下,模型泵的性能曲线趋势基本一致,扬程曲线均相对比较平坦,表现为典型的低比转速离心泵应有的特性。在设计工况点,清水介质时的扬程为 126.2 m,两相流介质时为 121 m。由图 3 可知,在两种介质下,流道 1 和流道 5 受蜗壳的影响,其内部均存在着明显的回流,而其他流道内的流动均较为稳定。清水介质下,流道 1、5 中靠近叶轮出口处存在一个较大回流,而在两相

流介质下, 流道 1、5 靠近叶轮进口及出口均存在明显的回流, 可见, 在相同工况下, 两相流介质时叶轮流道内的流动较清水介质时更为复杂。

### 3 小流量点下的计算结果与分析

图 4、图 5 为不同小流量工况下两种介质时叶轮中间截面的总压分布。由图 4、图 5 可见, 模型泵叶轮流道内的压力分布比较均匀, 压力沿着叶轮进口到叶轮出口方向逐渐增加; 除了叶轮流道 1、5, 流道内基本没有局部高压、局部低压、低速区以及高速区; 而受蜗壳隔舌区域的影响, 叶轮流道内的流动表现出明显的非对称性, 叶轮在扫掠隔舌后, 叶轮流道

内的部分流体进入蜗壳, 而另一部分流体发展成为二次流动等不稳定性流动, 与此同时, 蜗壳内的流体流经隔舌附近最后流向蜗壳出口, 此时蜗壳隔舌区域的流动最为复杂, 而距离隔舌最近的流道 1、5 内的流动受到的影响则最大, 主要表现为在叶片压力面附近存在局部高压区, 而在叶轮出口处总压降低。对比同一介质不同工况下叶轮中间截面的总压分布图, 可以发现, 随着流量增加, 流道内压力分布更加均匀; 而流量越小, 压力分布越不均匀, 流道 1、5 中的局部高压区越大, 压差也越明显; 而同一工况不同介质时, 叶轮流道内的总压分布总体趋势基本相似。

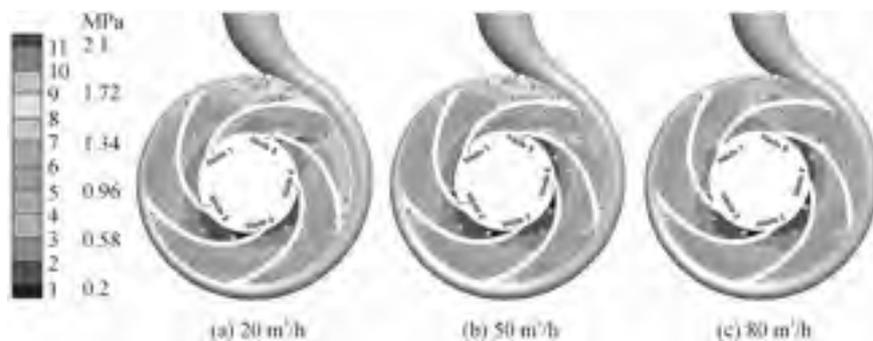


图 4 小流量工况下清水介质时总压分布

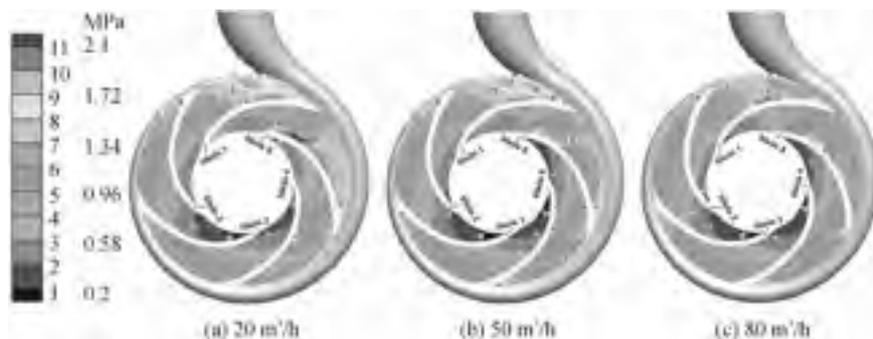


图 5 小流量工况下两相流介质时压力总压分布

图 6、图 7 为小流量工况下, 两种介质时, 叶轮中间截面相对速度的分布。在不同工况下, 叶轮流道 1、5, 受蜗壳隔舌区域的影响最大, 结合总压图可知, 这两个叶片流道内靠近叶轮出口的压力较叶片中间位置压力面处的总压更低, 整个流道内存在局部高压区和局部低压区, 造成流道内的流动变得极为复杂, 由图 6、图 7 可见, 在流道 1、5 内靠近叶轮出口处均存在着明显的回流现象及局部高速区, 尤其是在蜗壳隔舌区域, 局部压力降低, 从而产生局部低压区。

对比同一介质不同工况下叶轮中间截面的相对速度分布, 发现随着流量的增加, 流道内流动更为平稳, 而流量越小, 流道 1、5 内的回流越明显, 特别是

在流量为  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 流道 4 靠近叶轮出口处有明显的回流现象, 流动相对较为复杂; 而同一工况下, 两相流介质时叶轮流道内相对速度分布相较于清水介质时回流现象更为明显, 回流区域也相对更大。

图 8 为不同工况下两相流介质时叶轮中间截面固相体积浓度分布。图 9 为不同工况下叶片 3 压力面与吸力面上固相体积浓度分布, 考虑到蜗壳隔舌区域的影响, 因此选取离蜗壳隔舌最远的叶片 3 为分析对象。总体上, 从叶轮的进口到出口颗粒浓度分布逐渐趋于均匀; 而随着流量的增加, 叶片吸力面上固相浓度从叶片进口到出口逐渐增大, 且颗粒有向叶轮进口堆积的趋势, 而压力面上固相浓度从叶轮进口到出口逐渐减小; 同一工况下, 叶轮压力面靠

近叶片前缘处的颗粒浓度较大,而靠近叶片尾缘处的颗粒浓度相对较小,造成这种现象的原因是叶片前缘位置距离叶轮中心较近,受到由叶轮旋转而产生的离心力相对较小,这使得颗粒无法及时输送出去造成堆积;而在压力面尾缘处,由于颗粒受到的离心力较大,被快速地甩到蜗壳内,同时一部分颗粒受到叶片压力面与吸力面的压差的作用在吸力面尾缘

附近堆积,造成吸力面靠近尾缘处颗粒浓度比压力面处更大,从而使得流动发生堵塞。从局部看,颗粒浓度的分布并不均匀,叶片压力面进口处靠近叶根部位及叶顶处浓度分布相对较大,而叶片吸力面进口处靠近叶顶部位及出口处浓度分布相对较大,容易造成这些部位局部磨损,进而影响叶轮寿命。

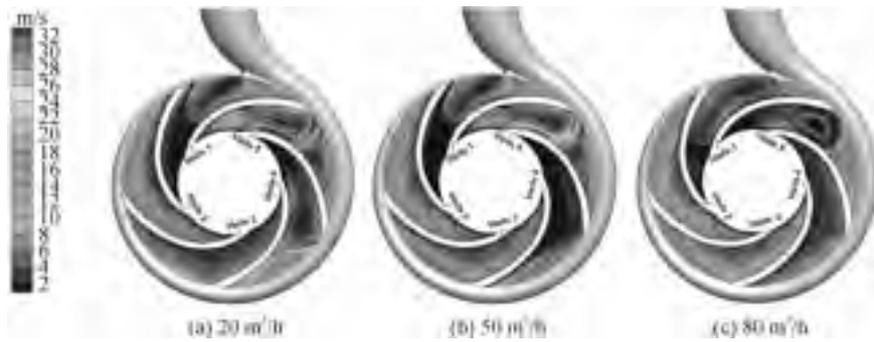


图 6 小流量工况下清水介质时相对速度分布

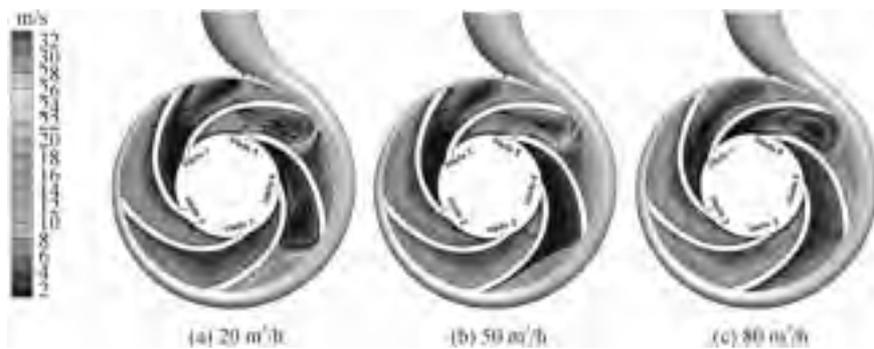


图 7 小流量工况下两相流介质时相对速度分布

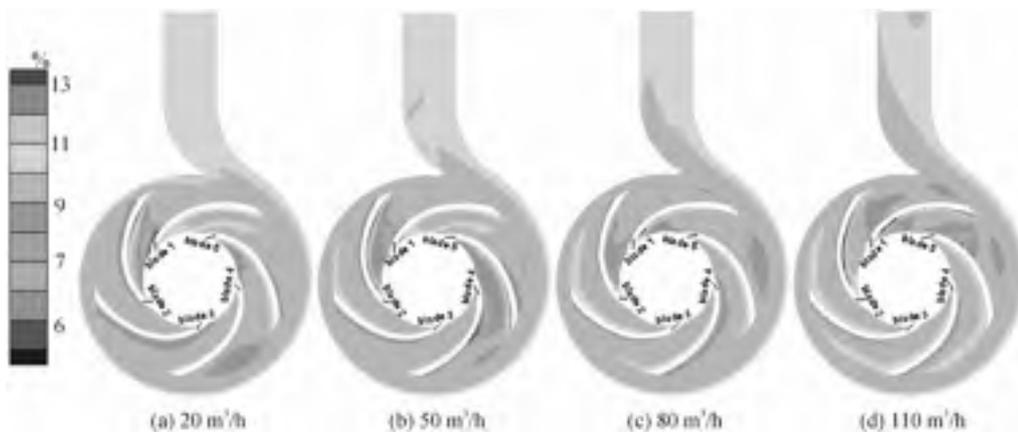


图 8 不同工况下固相体积浓度分布

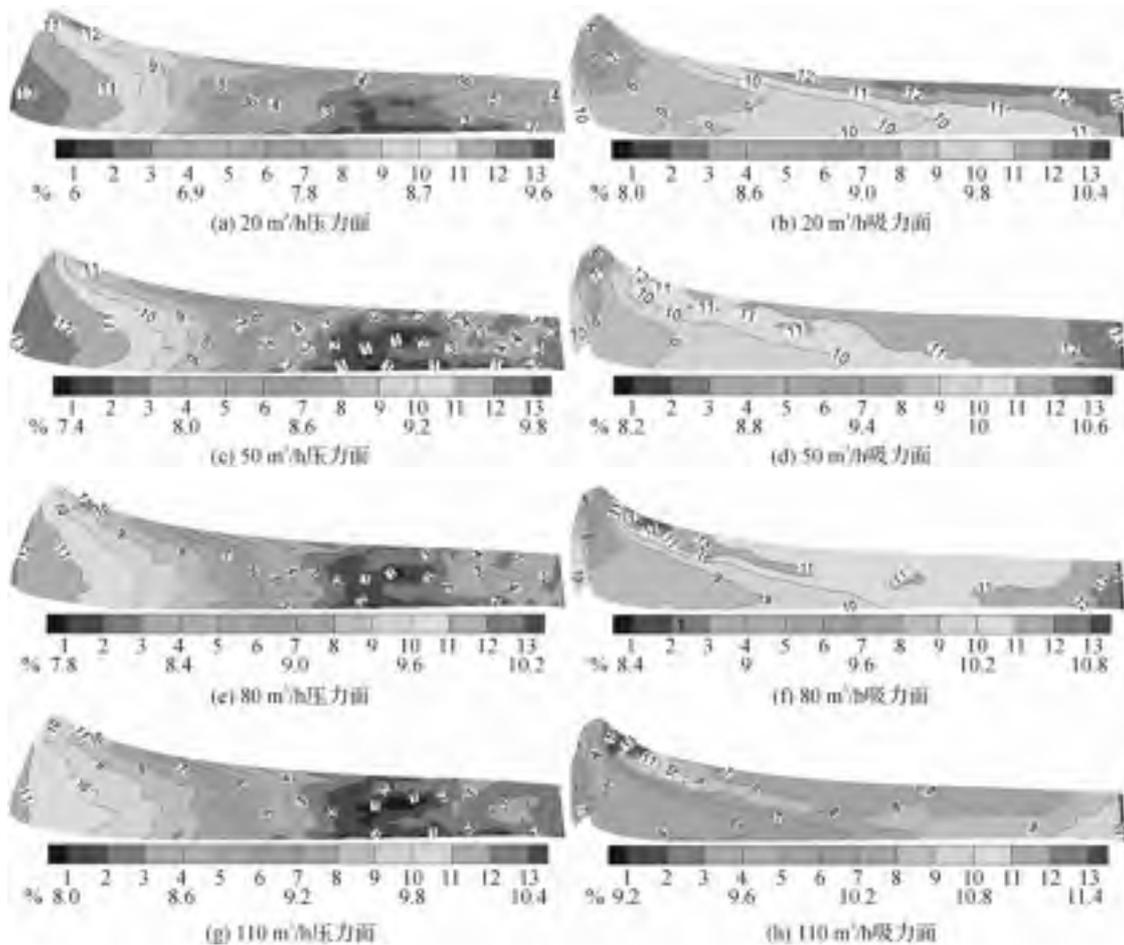


图9 不同工况下叶片表面固相体积浓度分布

## 4 结论

为研究小流量工况下离心式纸浆泵内部流动特性,采用 Mixture 多相流模型对某一离心式纸浆泵内部流动进行了三维不可压两相湍流流动计算,并与清水工况的单相流动计算结果进行了比较。靠近蜗壳的两个叶轮流道受蜗壳的影响较大,存在较大的回流,而其它流道中的流动相对较为稳定,无明显回流;相同介质时,流量越小叶轮流道内部流动越不稳定;相同工况下,清水介质时流动较两相流时更为稳定,两相流时泵的扬程及效率整体低于清水介质;叶片表面颗粒浓度分布不均,压力面进口处靠近叶根及叶顶部位浓度分布相对较大,而吸力面进口处叶顶部位及整个出口处浓度分布相对较大;随流量增加,叶片吸力面颗粒浓度沿叶片进口到出口逐渐增大,且有向进口堆积的趋势,而压力面上颗粒浓度从叶轮进口到出口逐渐减小。

## 参考文献:

[1] 陈克复, 李 军, 陈海峰, 等. 中高浓制浆造纸技术的理

论与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 55-67.

- [2] 吴 丹, 陈克复, 李 军, 等. 中浓浆泵的最新研究进展[J]. 造纸科学与技术, 2002, 21(1): 39-41, 46.
- [3] Sarah Bensons. Solving the problems of pumping medium to high density paper stock[J]. World Pumps, 1997 (3): 68-71.
- [4] Rewatkar V B, Bennington C P J. Gas-liquid mass transfer in low and medium consistency pulp suspensions [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78: 504-512.
- [5] Day M W. Considerations for design of medium-consistency stock pump systems[J]. Tappi J, 2001, 84(2): 35-37.
- [6] 李 红, 袁寿其, 袁建平, 等. 基于泵内纸浆悬浮液数值计算的纸浆泵设计[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 51-55.
- [7] 李 红, 张万义, 朱荣生, 等. 离心式纸浆泵的结构特点[J]. 中国造纸, 2003, 22(4): 38-41.
- [8] 李 红, 朱荣生, 曹卫东. 离心式低浓纸浆泵的研究[J]. 排灌机械工程学报, 2001, 19(6): 12-14.
- [9] 陈奇峰, 陈克复, 杨仁党, 等. 离心式中浓输浆泵的研究[J]. 中国造纸, 2006, 25(8): 48-50.

- [10] 陈奇峰, 陈克复, 杨仁党, 等. 基于 CFD 的中浓纸浆悬浮液在变径管内流动的数值模拟[J]. 中国造纸学报, 2004, 19(2): 96-98.
- [11] 黄烈群, 袁 静, 陈义红, 等. 螺旋式纸浆泵内部流动的数值模拟[J]. 机电工程, 2007, 24(12): 50-52, 95.
- [12] 王乐勤, 刘锦涛, 张乐福, 等. 水泵水轮机泵工况小流量波动特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(7): 1239-1243.
- [13] 张学静, 杨军虎. 小流量工况下离心泵的性能预测研究[J]. 节水灌溉, 2011(5): 17-19.

## Numerical Simulation of Internal Flow in Centrifugal Pulp Pump

JIA Xiao-qi<sup>1</sup>, CUI Bao-ling<sup>1</sup>, CHEN De-sheng<sup>1</sup>, HUANG De-shan<sup>2</sup>

(1. Provincial Key Lab of Fluid Transmission Technology Research, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Hangzhou Project & Research Institute of Electro-Mechanic in Light Industry, Hangzhou 310004, China)

**Abstract:** To study the internal flow features of centrifugal pulp pump under small flow working condition, this paper conducts three-dimensional incompressible two-phase turbulence flow computing for internal flow in a centrifugal pulp pump with Mixture multiphase flow and compares with the calculation result under fresh water working condition; conducts contrastive analysis on the influence of different flow working conditions and mediums on fluid velocity in the pump, pressure and volume concentration distribution and predicts the hydraulic performance; finds that the velocity change in impeller passage of pulp pump is nonuniform and there is a large area of backflow; with the same medium, the smaller the flow, the more unstable the internal flow in impeller passage; under the same working condition, the flow with fresh water medium is more stable than two-phase flow; the lift and efficiency of pump under two-phase flow are lower than that under fresh water medium; pulp distribution is nonuniform locally and its concentration in the root and on the top at the entrance on the blade surface, which is easy to cause local abrasion and reduce the life of impeller.

**Key words:** centrifugal pulp pump; numerical simulation; two-phase flow; performance prediction

(责任编辑: 张祖尧)