

叶片包角对高比转速离心泵固液两相流动的影响

万丽佳,宋文武,常方圆,张明祯

(西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039)

摘要:为研究叶片包角对高比转速离心泵固液两相流动的影响,采用 Mixture 多相流模型,利用 CFX 软件对 5 种不同叶片包角的高比转速离心泵进行了固液两相湍流数值模拟,分析了固液两相流中固体体积分数分布及速度变化规律。研究表明:在 2% 的泥沙含量条件下,随着叶片包角的增加,效率有所下降,叶片包角 $\varphi = 100^\circ$ 时效率最优;颗粒主要分布在叶轮后盖板及叶片背面尾部;固体速度在距后盖板的 0.7 位置及叶片头部位置达到最大;随着包角的增大,叶轮流道内的压力在减小,后盖板、叶片背面尾部的颗粒浓度明显降低,流道和叶片上的固体速度会增加;颗粒浓度下降速度快慢的临界点在距离后盖板 0.15 处;叶片背面颗粒浓度的峰值点出现在叶片长度为 0.9 处,此时, $\varphi = 110^\circ$ 时的颗粒含量受到包角的影响最大;综合颗粒体积分数及固相速度的分布规律,适当增大叶片包角使得效率降低,但可改善固液两相流离心泵后盖板及叶片背面磨损情况。

关键词:离心泵;固液两相;叶片包角;固体速度分布;固体体积分数分布

中图分类号:TH311 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.011

[引用本文格式]万丽佳,宋文武,常方圆,等.叶片包角对高比转速离心泵固液两相流动的影响[J].热能动力工程,2020,35(2):78-86. WAN Li-jia, SONG Wen-wu, CHANG Fang-yuan, et al. Effect of blade packet angle on solid-liquid two-phase flow of centrifugal pump with high ratio speed[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 78-86.

Effect of Blade Packet Angle on solid-Liquid Two-Phase Flow of Centrifugal Pump with High Ratio Speed

WAN Li-jia, SONG Wen-wu, CHANG Fang-yuan, ZHANG Ming-zhen

(School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan, China, Post Code: 610039)

Abstract: In order to explore the effect of blade packet angle on the solid-liquid two-phase flow of centrifugal pump with high specific rotational speed, this paper uses the mixture multiphase flow model and CFX to simulate the solid-liquid two-phase turbulence for high-ratio rotational speed centrifugal pumps with different blade packet angle, and analyzes the distribution law and velocity variation of solids in the solid-liquid. The results show that under the condition of 2% sediment content, the efficiency decreases with the increase of blade packet angle, and the optimal efficiency is reached as the blade packet angle $\varphi = 100^\circ$. The particles are mainly distributed in the rear cover plate of the impeller and the tail of the back of the blade, and the solid velocity reaches the maximum at 0.7 position and blade head at the rear cover plate. With the increase of the packet angle, the pressure in the blade rotation channel decreases, the concentration of particles in the rear cover plate and the back of the blade is clearly reduced, and the solid velocity on the runner and blade increases. The transition point of the decreasing rate of particle concentration is located at 0.15 from the rear cover plate, and the peak point of the particle concentration on the back of the blade appears at the blade length of 0.9, meanwhile, the effect of blade packet angle on

收稿日期:2018-01-19; 修订日期:2019-03-15

基金项目:四川省科技厅项目(2016JY0187);四川省教育厅重大培育项目(14CZ0013)

Fund-supported Project: Sichuan Provincial Science and Technology Department Project (2016JY0187), Sichuan Provincial Ministry of Education major cultivation Project (14CZ0013)

作者简介:万丽佳(1994-),女,四川自贡人,西华大学硕士研究生, E-mail: 1142237415@qq.com.

the particle content is the most at $\varphi = 110^\circ$. By considering the distribution law of particle volume fraction and solid phase velocity, increasing the blade packet angle decreases the efficiency, but it can improve the wear of the rear cover plate and blade back of the solid-liquid two-phase flow centrifugal pump.

Key words: centrifugal pump, solid-liquid two-phase, blade packet angle, solid velocity distribution, solid volume fraction distribution

引言

近年来,随着石油、化工等行业的发展,对离心泵的要求也越来越高,固液两相流离心泵在石油、化工等领域应用非常广泛。在实际中,离心泵输送的介质或多或少都会含有固体颗粒,这些固体颗粒在离心泵运行过程中必然会对过流部件造成一定的磨损,对离心泵的效率和使用寿命都有很大的影响。因此,通过优化叶片参数减小固液两相流离心泵的磨损,提高离心泵固液两相流水力性能是目前研究的重要课题之一。

廖姣等人^[1]采用 particles 粒子模型对离心泵进行全流道数值模拟,叶片表面颗粒体积分数及颗粒速度随泥沙颗粒直径的增加而上升,叶片进水边、叶片吸力面出水边磨损较为严重。郭仁宁等人^[2]对长短叶片离心泵输送固液两相流叶轮内部流场和流动规律进行了研究,长短叶片离心泵比普通离心泵叶轮流道内颗粒的高浓度区域更小,颗粒的分布更均匀,流动损失更小。CHENG C 等人^[3]对污水离心泵固液湍流进行了三维模拟,固体颗粒的滑移速度在后盖板吸力侧、压力侧和叶片背面增加,颗粒的增加使泵效率和扬程下降。LIU J 等人^[4]研究了泵内固液两相湍流,得到了不同粒径、不同体积分数的固体颗粒在非设计条件和不同比重下的分布。还有部分学者对固液两相流离心泵的磨损及内部流场做了相关研究^[5-15]。

但针对叶片包角对固液两相流离心泵的影响研究目前涉及较少,并且多数都是研究低比转速离心泵的固液两相流。因此,本研究利用 Mixture 多相流模型,对叶片包角为 $90^\circ \sim 130^\circ$ 的高比转速离心泵在设计流量工况下叶轮内固液两相流动进行数值模拟,初步揭示叶片包角对高比转速离心泵叶轮内固液两相流的颗粒体积分布及速度场的影响规律,通过对叶片包角调整,减少固相颗粒与叶片的碰撞损失,达到效率和磨损的最优化,为固液两相流离心泵叶片包角的选择提供一定的参考。

1 数学模型

采用 Mixture 多相流模型,介质为含沙水。连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \quad (4)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \quad (6)$$

相对速度:

$$\mathbf{v}_{p,q} = \mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q \quad (7)$$

相对速度转换为漂移速度:

$$\mathbf{v}_{dr,p} = \mathbf{v}_{p,q} \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \mathbf{v}_{q,k} \quad (8)$$

第二相的体积分数方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{v}_m$ —质量平均速度, m/s; ρ_m —混合密度, kg/m³; α_k —第 k 相体积分数; ρ_k —第 k 相的密度, kg/m³; $\mathbf{v}_k$ —相对速度, m/s; n —相数; ∇p —压差力, N; $\mathbf{F}$ —体积力, N; μ_m —混合粘性; μ_k —第 k 相的粘性; $\mathbf{v}_{dr,k}$ —第 k 相的漂移速度, m/s; $\mathbf{v}_{p,q}$ —相对速度, m/s; $\mathbf{v}_p$ —第二相 (p) 的速度, m/s; $\mathbf{v}_q$ —主相 (q) 的速度, m/s; $\mathbf{v}_{dr,p}$ —第二相 p 的漂移速度, m/s; $\mathbf{v}_{q,k}$ —第 k 相的速度相对于主相 (q) 的速度, m/s; α_p —第 p 相体积分数; ρ_p —第 p 相的密度, kg/m³。

2 泵内湍流场的计算

2.1 基本参数

以单级离心泵作为模型,该模型主要包括进水段、叶轮、蜗壳和出水段,如图 1 所示。模型参数:转速 $n = 1\,450\text{ r/min}$,设计扬程 $H = 28\text{ m}$,设计流量 $Q = 620\text{ m}^3/\text{h}$,比转速 $n_s = 180$,叶轮进口直径 $D_2 = 225\text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 54\text{ mm}$,叶轮直径 $D_1 = 347\text{ mm}$,叶片数 $Z = 5$,5 个叶片包角 φ 分别为 90° 、 100° 、 110° 、 120° 和 130° ,不同叶片包角的叶轮三维模型如图 2 所示。

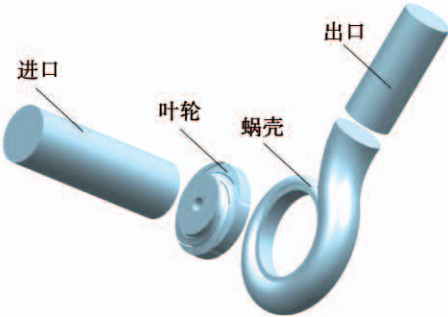


图 1 离心泵三维模型

Fig.1 3D modeling of impeller channel

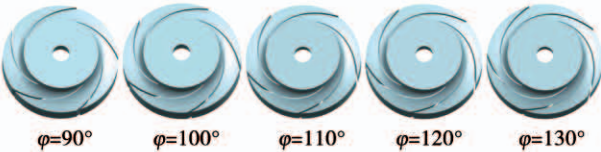


图 2 不同包角的叶轮三维模型

Fig.2 3D modeling of impeller with different packet angles

2.2 网格计算

采用非结构性四面体网格。运用 ICEM 软件把离心泵划分为进口、叶轮、蜗壳和出口 4 个区域,并对叶片及隔舌进行局部加密,计算域网格如图 3 所示。网格无关性检查如图 4 所示,随着网格数的增加,含沙离心泵的效率 and 扬程均有减小的趋势,当网格数大于 2.56×10^6 时,含沙离心泵的扬程和效率都趋于稳定。不同包角离心泵划分网格数如表 1 所示。

2.3 基本假设及边界条件

假设固体颗粒当作拟流体,固体与液体相互渗透,不产生相变。固液两相流体参数:液相设置为清水,固相定义为沙粒,固相密度 $\rho_p = 2\,650\text{ kg/m}^3$,液

相为清水,密度 $\rho_q = 998\text{ kg/m}^3$,沙粒直径 $d = 0.1\text{ mm}$ 。比重设置:固相体积分数 0.02;液相体积分数为 0.98。

泵的进口选用总压作为该离心泵进口边界条件,出口设置为质量流。叶轮水体壁面设置为旋转,其余壁面设置为静止,在固壁面采用无滑移边界条件,近壁处采用标准壁面函数,叶轮与蜗壳的交界面设置为冷冻转子。计算精度设为 10^{-6} ,计算步数设置为 2000 步,最终在 1000 步内收敛于 10^{-5} ,达到收敛要求。



图 3 计算域网格

Fig.3 Computational domain grid

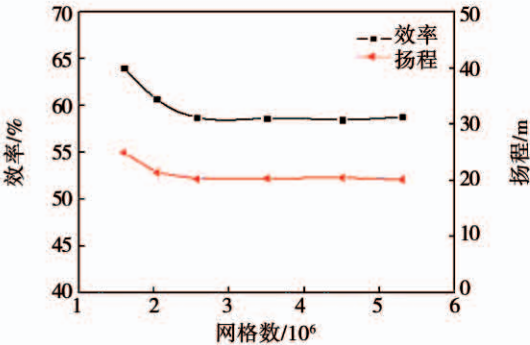


图 4 网格无关性分析

Fig.4 Grid irrelevance analysis

表 1 设计方案网格数

Tab.1 Design scheme mesh number

包角 $\varphi/(^\circ)$	叶轮	蜗壳	出口	进口	网格总数
90	733 318	667 135	425 469	764 569	2 590 491
100	754 985	667 135	425 469	764 569	2 612 158
110	777 192	667 135	425 469	764 569	2 634 365
120	799 422	667 135	425 469	764 569	2 656 595
130	820 506	667 135	425 469	764 569	2 677 679

3 计算结果与分析

3.1 外特性

不同叶片包角的离心泵分别在清水条件和含颗

粒条件下的外特性曲线如图 5 所示。

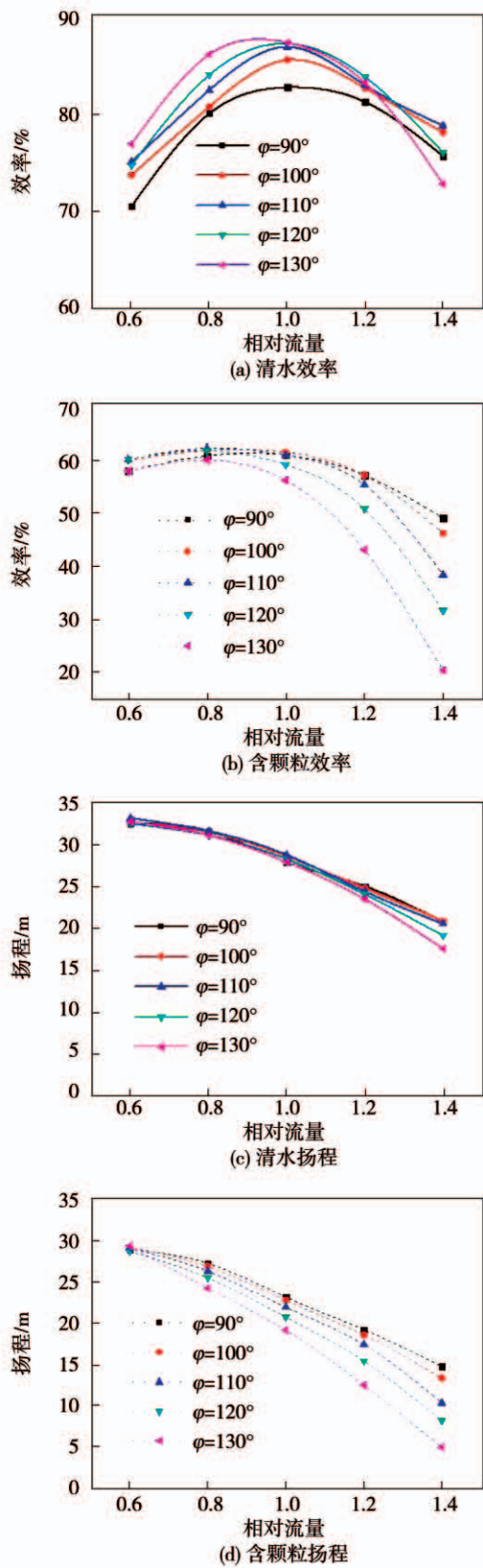


图 5 外特性曲线
Fig. 5 External characteristic curve

清水条件与颗粒浓度为 0.02 条件下不同叶片

包角离心泵的效率均随流量的增大先增大后减小。在设计流量下,清水离心泵的效率随着叶片包角的增大而增大, $\varphi = 120^\circ$ 的效率最优为 87.23%。而固液两相流离心泵的效率随着叶片包角的增大先增大后减小, $\varphi = 100^\circ$ 的效率最优为 61.54%。这是由于受到固体颗粒的影响,使得两相流在离心泵内的流动发生变化。随着叶片包角的增加,再加上颗粒的影响,使得两相流动对流道的摩擦损失增大,并使得最优效率向小流量工况移动。

对比可以看出,固体颗粒对离心泵的效率影响很大,不同的叶片包角对于离心泵在清水条件下和含颗粒条件下的效率影响是不同的,两相流离心泵的效率最优的包角值比相同情况的清水离心泵效率最优的包角值小。

从图 5(c)、图 5(d)中可知,随着流量的增加,清水离心泵和含颗粒离心泵的扬程逐渐降低。随着叶片包角的增大,清水离心泵扬程变化不明显,而固液两相流离心泵扬程明显降低。

3.2 叶轮内压力分布

压力是驱动固体颗粒分布及其速度变化的根源。图 6 为不同叶片包角的固液两相流离心泵叶轮流道压力云图。由图可以看出,压力沿着流道方向逐渐增大,叶片工作面的压力明显大于叶片背面的压力。随着叶片包角的增大,叶片变弯变长,流道内的压力在减小。由此可以看出,适当增大叶片包角可以减小叶轮流道内的压力。

3.3 叶轮内颗粒分布

3.3.1 前、后盖板

图 7 为叶片包角分别为 90° 、 100° 、 110° 、 120° 和 130° 时的离心泵后盖板的固体体积分数。由图可知,固体颗粒主要聚集在后盖板流道位置以及叶片工作面位置,随着叶片包角的增大,后盖板流道位置的颗粒含量在减小,后盖板叶片上的颗粒含量在增加,且后盖板叶片工作面颗粒含量增加更为明显。

由图 8 前盖板的固体体积分数可知,固体颗粒主要集中在前盖板叶片背面位置,随着叶片包角的增大,前盖板叶片上的颗粒含量在减小,其中前盖板叶片背面颗粒含量减小更为明显。

由图 7、图 8 可知,叶轮后盖板及叶轮前盖板的叶片背面磨损较为严重。

为了得到不同叶片包角的离心泵后盖板到前盖

板位置的固体体积分布的具体情况,分析叶片包角分别为 90°、100°、110°、120° 和 130° 时的离心泵后盖板

到前盖板位置的固体体积分数曲线,如图 9 所示(横坐标 0 到 1 表示后盖板到前盖板的无量纲距离)。

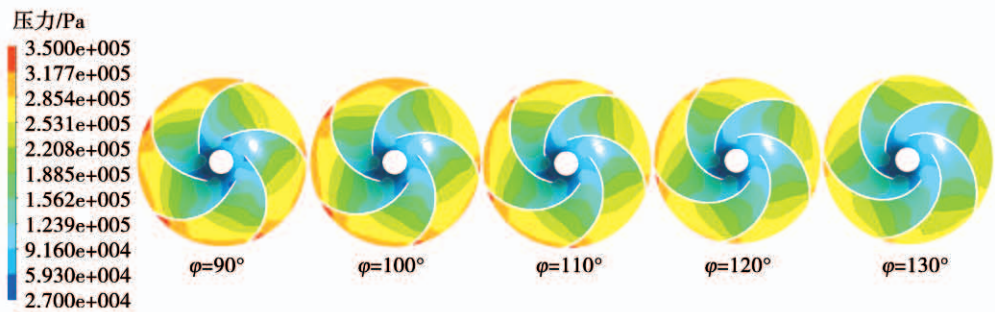


图 6 叶轮流道压力分布
Fig. 6 Pressure distribution of blade rotation channel

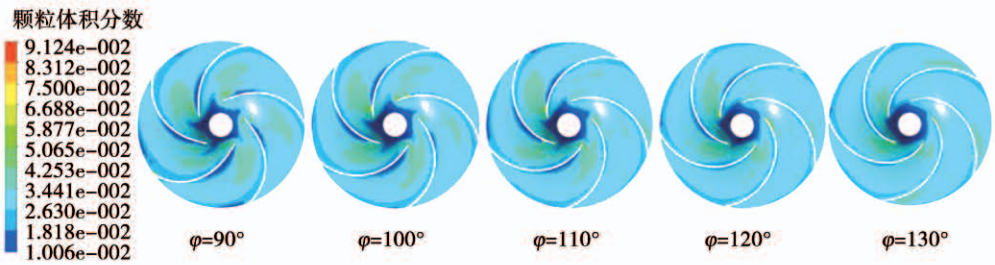


图 7 叶轮后盖板固相体积分数
Fig. 7 Pressure distribution of leaf rotation channel

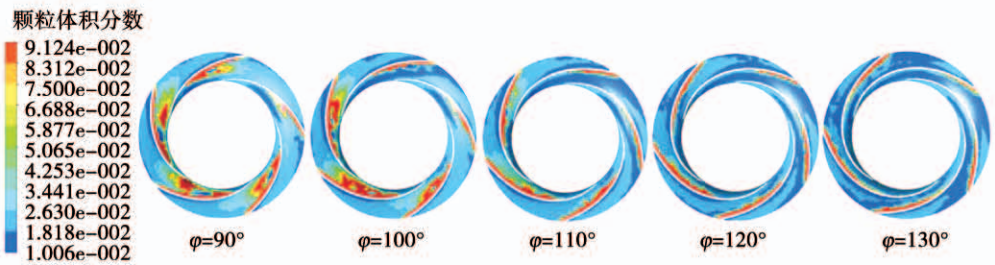


图 8 叶轮前盖板固相体积分数
Fig. 8 Pressure distribution of leaf rotation channel

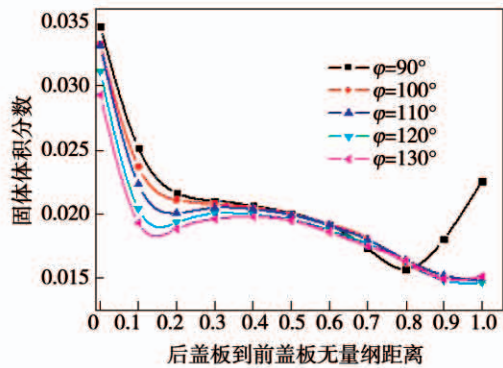


图 9 后盖板到前盖板位置的固体体积分数曲线图
Fig. 9 Solid volume fraction from rear cover plate to front cover plate

由图可知,从叶轮后盖板到前盖板,曲线均先降低后达到平稳再缓慢降低。随着包角的增大,叶轮后盖板的颗粒体积分数在减小。在后盖板位置颗粒体积分数最高;在距离后盖板 0.15 位置处,为颗粒体积分数下降速度快慢的临界点。在 0.15 位置之前,固体体积分数的下降速度大;当达到临界点以后,固体体积分数变化平缓。达到后盖板 0.8 位置时, $\varphi=90^\circ$ 时的颗粒体积分数出现回升。这是由于小叶片包角叶片对流体的束缚更差,使得小包角的固体颗粒扩散比大包角的更严重,导致小包角的前

盖板磨损严重。

由此可以看出,颗粒主要分布在叶轮后盖板上,增大叶片包角可减小后盖板以及前盖板的磨损情况。

3.3.2 叶片上

图 10 为叶片工作面的固相体积分数分布,由图可知,固体颗粒主要集中在叶片工作面头部中部和顶端位置。随着叶片包角的增大,颗粒会从叶片底端向顶端移动,叶片工作面头部、顶端的颗粒体积分数在增大,叶片底端的颗粒体积分数在减小。

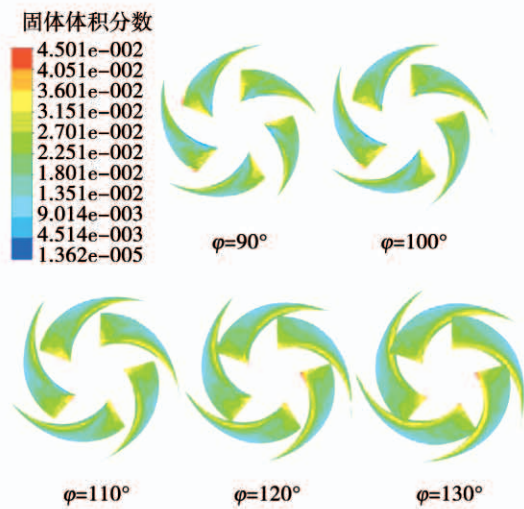


图 10 叶片工作面固相体积分数

Fig. 10 Solid volume fraction graph of rear cover

图 11 为叶片背面上的固相体积分数分布,固体颗粒主要集中在叶片背面尾部、中部及下端位置。随着叶片包角的增大,颗粒会向叶片背面中部和底端迁移,尾部颗粒含量会减小。由图 10、图 11 可知,叶片背面,特别是叶片背面尾部的磨损较为严重。

叶片包角分别为 90°、100°、110°、120°和 130°时的离心泵叶片上固相体积分数变化如图 12 所示(横坐标表示叶片长度)。由图可知,在叶片工作面上,5 种包角的曲线都相对平缓,变化基本一致。叶片背面:随着叶片长度增加,曲线均先平缓再逐渐升高最后降低,尤其在叶片背面后半段,在叶片长度为 0.9 位置处,为不同叶片包角叶片上的颗粒体积分数峰值点。此时,φ = 110°时的颗粒含量受到包角

的影响最大。

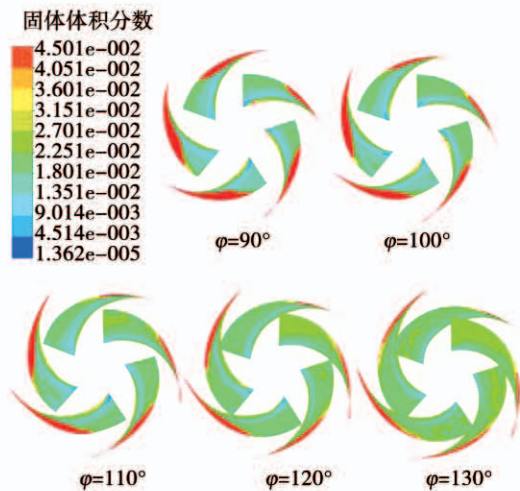


图 11 叶片背面固相体积分数

Fig. 11 Solid volume fraction graph of rear cover

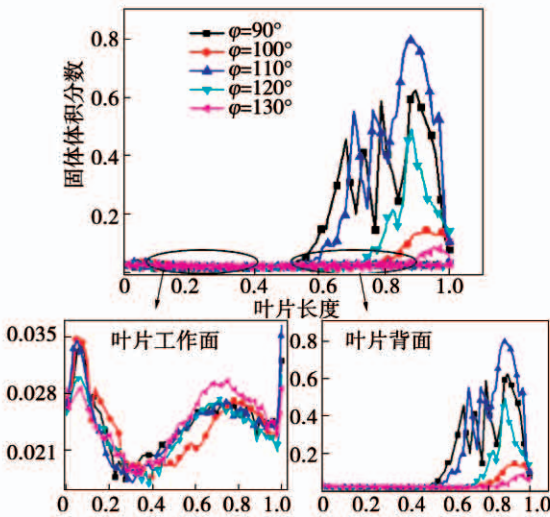


图 12 不同包角叶片上固相体积分数曲线

Fig. 12 Solid volume fraction from rear cover plate to front cover plate

由此可以看出,颗粒体积分数主要聚集在叶片背面尾部,随着叶片包角的增大,叶片背面尾部的颗粒体积分数明显降低,说明叶片包角对叶片背面颗粒分布有显著影响,适当增大叶片包角可以改善固液两相流离心泵叶片背面的磨损情况。

3.4 叶轮内颗粒速度

由图 13 叶轮流道中截面为 0.1 处不同包角的叶轮固相速度分布云图可知,在同一截面上随着叶

片包角的增大,叶片上的固相速度会增大且叶片背面的固相速度比叶片工作面增加得更为明显。

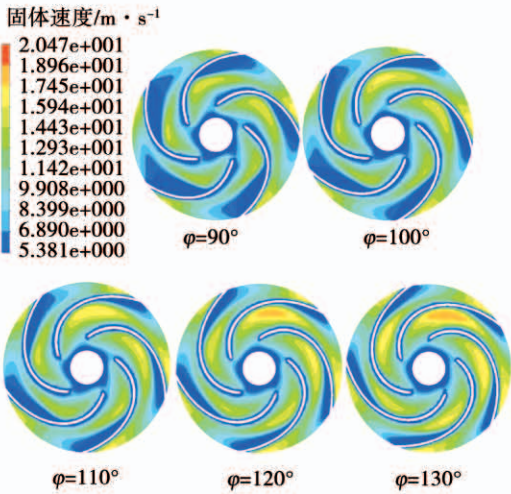


图 13 0.1 截面处叶轮流道固相速度分布
Fig. 13 0.1 velocity distribution of solid phase in the impeller passage

为了得到不同叶片包角的离心泵后盖板到前盖板位置的固相速度分布的具体情况,分析叶片包角分别为 90°、100°、110°、120°和 130°时的离心泵后盖板到前盖板位置的固相速度曲线,如图 14 所示(横坐标 0 到 1 表示后盖板到前盖板的无量纲距离)。

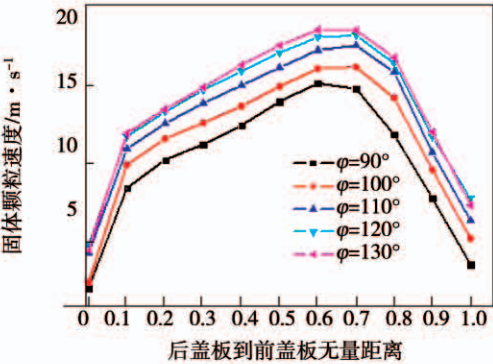


图 14 后盖板到前盖板位置的固相速度曲线
Fig. 14 Solid velocity from rear cover plate to front cover plate

从叶轮后盖板到前盖板,曲线先陡增再缓慢上升达到峰值后陡降。随着包角的增大,叶轮后盖板到前盖板的固相速度均在减小。距后盖板 0.1 位置为固相速度增长快慢的第一个临界点。在 0.1 位置

之前,固体速度上升快;达到 0.1 位置后,固体速度上升变缓。距叶轮后盖板 0.7 位置为颗粒速度变化的第二个临界点,也是固体速度的极大值点。包角从 90°增大到 130°,颗粒速度增大了 20.09%;达到第二个临界点后,固体速度开始快速下降。

由此可以得出,叶轮内部的颗粒速度会随着叶片包角的增大而增大,其中在距后盖板 0.7 位置时,颗粒速度达到最大,受叶片包角影响最明显。

不同叶片包角离心泵叶片上固相速度变化如图 15 所示。

叶片工作面:随着叶片长度增加,固体速度均先减小后增大再下降。在叶片头位置,颗粒速度最大。在叶片长度为 0.2 时出现极小值点。在达到 0.2 位置之前,不同包角的固体速度快速下降;达到 0.2 位置后,固体速度开始上升。在叶片长度为 0.83 的位置,出现极大值点,之后固体速度开始下降。

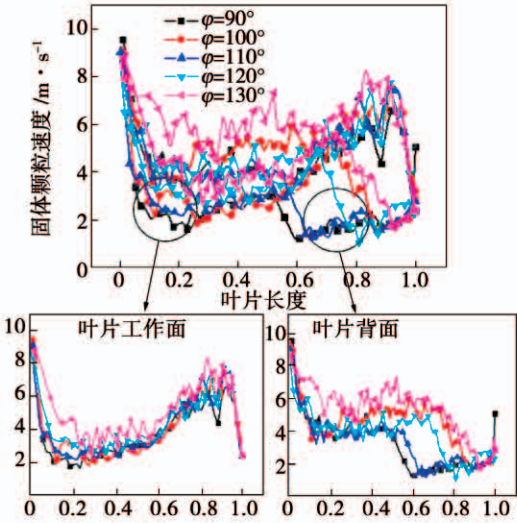


图 15 不同包角叶片上的固相速度
Fig. 15 Solid velocity on blades with different blade packet angle

叶片背面:随着叶片长度增加,曲线均陡降再平缓上升,再陡降再平缓上升。叶片长度为 0.13 位置出现第一个极小值点。在 0.13 位置之前,固体速度快速下降;达到 0.13 位置后,固体速度趋于平缓。在 0.45 叶片长度时,φ = 90°,来到第二极大值点,随着包角的增大,极大值点向叶片尾部移动。φ = 90°

的固体到达 0.45 位置后,速度开始快速降低,此时从 $\varphi = 90^\circ$ 到 $\varphi = 130^\circ$,颗粒速度增大了 37.41%。在叶片长度为 0.6 位置 $\varphi = 90^\circ$ 出现第二极小值点也是最小值点,不同包角的最小值点往叶片尾部迁移。

可以看出,固体速度最大值出现在叶片头部。随着叶片包角的增大,叶片背面的固相速度增大较为明显。

4 结 论

(1) 高比转速离心泵在纯水条件下,包角 $\varphi = 120^\circ$ 时效率达到最优;而在固液两相条件下,最优效率的包角值 $\varphi = 100^\circ$ 。

(2) 颗粒主要分布在叶轮后盖板及叶片背面尾部。增大叶片包角,叶轮流道内的压力减小,后盖板、叶片背面尾部的颗粒浓度明显降低。颗粒浓度下降快慢的临界点在距离后盖板 0.15 处;叶片背面颗粒浓度的峰值点出现在叶片长度为 0.9 处,此时 $\varphi = 110^\circ$ 时的颗粒含量受到包角的影响最大。

(3) 增大叶片包角,流道和叶片的固体速度均增大。距后盖板 0.7 位置及叶片头部位置时,颗粒速度最大;叶片背面长度为 0.45 时,受包角影响较大。

综合颗粒体积分数及固相速度的分布规律,选择叶片包角考虑效率的同时应着重考虑前、后盖板及叶片的磨损问题。

参考文献:

- [1] 廖 姣,赖喜德,廖功磊,等.基于固液两相流的离心泵内部流场数值分析[J].热能动力工程,2017,32(5):95-99,139-140.
LIAO Jiao, LAI Xi-de, LIAO Gong-lei, et al. Numerical analysis of internal flow field of centrifugal pump based on solid-liquid two-phase flow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(5): 95-99, 139-140.
- [2] 郭仁宁,肖春艳,李国威.长短叶片离心泵内固液两相流场三维数值模拟[J].热能动力工程,2016,31(1):87-92,136.
GUO Ren-ning, XIAO Chun-yan, LI Guo-wei. Three-dimensional numerical simulation of the internal solid-liquid two-phase flow field of the long-length blade centrifugal pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(1): 87-92, 136.
- [3] CHENG C, SHI W, ZHANG D, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in swept-back sewage centrifugal pump[C]. ISFMFE-international Symposium on Fluid Machinery & Fluid Engineering. IET, 2015.
- [4] LIU J, XU Y, WANG D, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 86-90.
- [5] LI Y, ZHU Z, HE Z, et al. Abrasion characteristic analyses of solid-liquid two-phase centrifugal pump[J]. Journal of Thermal Science, 2011, 20(3): 283-287.
- [6] YANG Min-guan, KANG Can, DONG Xiang, et al. Influence of blade outlet angle on inner flow field of centrifugal pump transporting salt aqueous solution[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(6): 912-917.
- [7] 杨 帆,马长明,孙嘉斌.基于数值模拟的多级离心泵叶轮固液两相磨损特性分析[J].水电能源科学,2018,36(2):163-166.
YANG Fan, MA Chang-ming, SUN Jia-bin. Analysis of solid-liquid two-phase wear characteristics of multistage centrifugal pump impeller based on numerical simulation[J]. Hydropower Energy Science, 2018, 36(2): 163-166.
- [8] 谭东华,朱祖超,崔宝玲.固液两相双流道泵的设计与试验研究[J].流体机械,2006(5):1-4.
TAN Dong-hua, ZHU Zu-chao, CUI Bao-ling. Design and experimental study of solid-liquid two-phase dual-flow channel pump[J]. Fluid Machinery, 2006(5): 1-4.
- [9] 李国威,冯新伟,崔俊奎,等.两种叶型离心泵内固液两相流场的对比[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):116-119.
LI Guo-wei, FENG Xin-wei, CUI Jun-kui, et al. Comparison of solid-liquid two-phase flow fields in two kinds of leaf centrifugal pumps[J]. South-to-North Water Conservancy technology, 2012, 10(2): 116-119.
- [10] 陈次昌,杨昌明,熊茂涛.低比转速离心泵叶轮内固液两相流的数值分析[J].排灌机械,2006(6):1-3.
CHEN Ci-chang, YANG Chang-ming, XIONG Mao-tao. Numerical analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump impeller

- ler with low specific rotational speed[J]. Irrigation and Drainage Machinery, 2006(6): 1-3.
- [11] 戴江, 吴玉林, 孙自祥, 等. 离心泵叶轮中固液两相紊流计算[J]. 工程热物理学报, 1996(1): 46-49.
- DAI jiang, WU Yu-lin, SUN Zi-xiang, et al. Calculation of solid-liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump impeller[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 1996(1): 46-49.
- [12] ZHAO Z, MIN S, WEI H, et al. Inducted force characteristics of solid-liquid two-phase unsteady flow in screw centrifugal pump[J]. Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering, 2015.
- [13] CAO Wei-dong, ZHANG Yi-ning, Yao Ling-jun. Analysis on solid-liquid two-phase flow and abrasion property in multistage centrifugal pump[J]. Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering, 2017.
- [14] SHEN Z J, LI R N, W HAN, et al. The research on particle trajectory of solid-liquid two-phase flow and erosion predicting in screw centrifugal pump[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 129: 012052.
- [15] 关醒凡. 现代泵设计理论[M]. 北京: 宇航出版社, 2010.
- GUAN Xin-fan. Modern pump design theory[M]. Beijing: Aerospace Press, 2010.
- (丛敏编辑)
- (上接第 69)
- [10] 黄鑫, 赵捍东. 基于广义回归神经网络的弹丸落点预报方法[J]. 测试科学与仪器(英文版), 2016, 7(1): 7-12.
- HUANG Xin, ZHAO Han-dong. Projectile impact point prediction method based on GRNN[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(1): 7-12.
- [11] ROOKI R. Application of general regression neural network for indirect measuring pressure loss of Herschel-Bulkley drilling fluids in oil drilling[J]. Measurement, 2016(85): 184-191.
- [12] PAN W C. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26(3): 69-74.
- [13] 宋清昆, 侯玉杰. 基于 MFOA 的锅炉热效率及 NO_x 排放建模与优化[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 98-99.
- SONG Qing-kun, HOU Yu-jie. Modeling optimization for boiler based on modified fruit fly algorithm[J]. Computer Simulation, 2018, 35(1): 98-99.
- [14] 李冬辉, 尹海燕, 郑博文. 基于 MFOA-GRNN 模型的年电力负荷预测[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 587-588.
- LI Dong-hui, YIN Hai-yan, ZHENG Bo-wen. An annual load forecasting model based on GRNN with multi-swarm fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 587-588.
- [15] 李帅龙, 崔国民, 肖媛. 一种多子群协进化的粒子群算法同步综合换热网络[J]. 热能动力工程, 2017, 32(4): 21-24.
- LI Shuai-long, CUI Guo-min, XIAO Yuan. A multi-subpopulation co-evolutionary particle swarm optimization algorithm for simultaneous synthesis of heat exchanger networks[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(4): 21-24.
- [16] 王波, 赵玉柱. 基于能耗敏感性的超超临界 660MW 汽轮机经济性分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 47-48.
- WANG Bo, ZHAO Yu-zhu. Economic analysis of an ultra-supercritical 660 MW steam turbine based on energy consumption sensitivity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 47-48.
- (丛敏编辑)