

颗粒体积分数对天然气水合物多相混输泵内流特性的影响

史广泰,舒泽奎,王彬鑫,钊江龙

(西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039)

摘要:为研究颗粒体积分数对天然气水合物多相混输泵内流特性的影响,基于 ANSYS CFX 软件采用非均相模型和 particle 模型,选用甲烷水合物颗粒体积分数为 5%、10%、15% 和 20% 的海水为介质,对多相混输泵流场进行数值模拟。结果表明:当颗粒体积分数较低时多相混输泵叶轮和导叶内旋涡较小,但随着颗粒体积分数的增加多相混输泵叶轮和导叶内轴向旋涡逐渐增大;在叶轮流道内颗粒分布较为均匀,而随着颗粒体积分数的增加,导叶内较大的旋涡影响导致颗粒在导叶内出现明显的聚集现象,在导叶叶片表面颗粒主要聚集在吸力面前半部分,其分布区域远大于压力面,即导叶吸力面更易受到磨损;随着颗粒体积分数的增加,多相混输泵的扬程和效率均逐渐降低。

关键词:天然气水合物;混输泵;固液两相;流动特性

中图分类号: TG974.1 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.004

[引用本文格式]史广泰,舒泽奎,王彬鑫,等.颗粒体积分数对天然气水合物多相混输泵内流特性的影响[J].热能动力工程,2021,36(11):26-33. SHI Guang-tai, SHU Ze-kui, WANG Bin-xin, et al. Effect of particle volume fraction on internal flow characteristics of natural gas hydrate multiphase mixed pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 26-33.

Effect of Particle Volume Fraction on Internal Flow Characteristics of Natural Gas Hydrate Multiphase Mixed Pump

SHI Guang-tai, SHU Ze-kui, WANG Bin-xin, DOU Jiang-long

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

Abstract: In order to investigate the effect of particle volume fraction on internal flow characteristics of natural gas hydrate multiphase mixed pump, the brine with the methane hydrate particle volume fraction of 5%, 10%, 15% and 20% was selected as medium, the inhomogeneous phase model and particle model were adopted to numerically simulate the flow field of multiphase mixed pump based on ANSYS-CFX software. The results show that when the volume fraction of the particle is low, the vortex in the impeller and guide vane of the multiphase mixed pump is smaller. But with the increase of the volume fraction of the particle, the axial vortex in the impeller and guide vane of the multiphase mixed pump increases gradually. In the impeller flow channel, the particle distribution is relatively uniform, with the increase of the volume fraction of the particle, due to the effect of the larger vortex in the guide vane, the particles appear obvious aggregation in the guide vane. On the surface of guide vane, the particles mainly gather on the first

收稿日期:2020-12-21; 修订日期:2021-01-09

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0905200);中国博士后科学基金特别资助(2017T100077);中国博士后科学基金面上资助(2016M600090);四川省教育厅科研项目资助(重点项目)(17ZA0366)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Project(2018YFB0905200); China Postdoctoral Science Fund Special Project(2017T100077); China Postdoctoral Science Fund General Project(2016M600090); Scientific Research Project of Education Department of Sichuan Province(Key Project)(17ZA0366)

作者简介:史广泰(1985-),甘肃会宁人,西华大学副教授。

通讯作者:舒泽奎(1994-),男,四川自贡人,西华大学硕士研究生。

half part of suction surface, and its distribution area is much larger than the pressure surface, so the suction surface of the guide vane is more susceptible to wear. At the same time, with the increase of the volume fraction of particle, the head and efficiency of the multiphase mixed pump will decrease gradually.

Key words: natural gas hydrate, mixed pump, solid-liquid two-phase, flow characteristics

引 言

天然气水合物具有储量规模大,资源分布广、能量密度高等特点,被认为是最具潜力的能源。天然气水合物属于清洁能源,燃烧产物主要为二氧化碳和水。天然气水合物在使用常规开采方法时存在着分解气体易泄漏、难收集等问题。因此,2014 年周守为院士^[1]提出针对天然气水合物的绿色开采技术——固态流化法:在海底对天然气水合物进行挖掘、收集和颗粒化处理,以固体的形式与海水混合收集,然后通过泵送系统将混合浆体输送至海洋工作平台,因此涉及到多相流输送泵的研发问题。

目前已有一些学者对多相混输泵进行研究。史广泰等人^[2-9]采用 ANSYS 软件对螺旋轴流式多相混输泵的气液两相进行数值模拟,主要从能量转换特性、空化特性、湍流强度和湍流耗散特性、叶顶间隙等方面进行研究。苗长山等人^[10]对多相混输泵气液两相进行数值模拟和实验结果对比,研究发现,在设计工况点时数值计算得到的外特性与实验值吻合,而远离设计工况点时数值计算准确性下降。在天然气水合物输送方面,不少学者也对天然气水合物在输送管路中的流动特性进行了研究。李长俊等人^[11]建立了伴随天然气水合物颗粒生长、分解、聚集和沉积的固液气三相管输模型,定量描述了水合物颗粒的发展过程和三相流动规律。罗丹^[12]建立了天然气水合物流态化分解耦合流动的轴向模型,分析了流化床温度、流化气速、入口气压、颗粒粒径和流化床宽度对水合物转化率和轴向气固相浓度的影响,研究发现,流化床温度和颗粒粒径是影响水合物分解速率的最主要因素。曾义聪等人^[9]建立了沿管道方向压力和分解量与海洋深度的函数关系,求出了分解临界面的深度,分析了管径、颗粒粒径、浆体流速、输送体积浓度和矿物密度对分解临界面和产生气体质量的影响,研究发现,沿管道的水力损失越小,临界分界面越深,气体分解量越多的规律。

刘艳军等人^[13]采用 Euler 多相流模型对天然气水合物浆体垂直管道输运的固液两相流进行研究,结果显示,管道内天然气水合物颗粒体积分数分布沿横截面中心到管壁梯度减小,但是靠近管壁的颗粒体积分数突变为最大值。赵鹏飞等人^[11]基于 Euler-Euler 双流体模型,建立描述管道内水合物浆体流动的数值模型,并对水合物浆体的粒径和阻力特性进行分析,研究发现,与 Mulhe 粒径模型相比, Camargo 粒径模型考虑了水合物聚结体间的相互作用,粒径模型计算结果与实验值更为接近,且水合物颗粒在管道截面上呈梯级分布并以细小颗粒为主,大颗粒所占体积分数较低。

通过对上述文献的分析可知,关于天然气水合物颗粒体积分数对多相混输泵内流特性影响的研究较少。基于此,借鉴文献[14~19]对泵输送固液两相流的研究方法,采用 ANSYS CFX 数值计算软件,通过改变天然气水合物颗粒体积分数对多相混输泵内的流动特性进行研究。

1 数值计算方法

1.1 物性参数及基本假设

以含甲烷水合物颗粒的海水为介质,设置甲烷水合物颗粒直径为 1 mm,根据文献[10]数据,设置甲烷水合物颗粒与海水的物性参数,如表 1 所示。

表 1 甲烷水合物颗粒与海水的物性参数
Tab.1 Physical parameters of methane hydrate particle and brine

名称	密度/kg·m ⁻³	动力粘度/Pa·s ⁻¹
甲烷水合物颗粒	910	0.001 63
海水	1 025	0.001 7

为实现多相混输泵内固液两相流的数值计算,作如下假设:

- (1) 液相海水为连续的不可压缩流体,固相甲烷水合物为离散的固体颗粒,各相的物理特性均为常数;
- (2) 固相颗粒为球形,粒径均匀,不考虑相变;

(3) 泵内为定常流动,液相为海水,固相为单一同种颗粒的甲烷水合物。

1.2 流体域几何模型

以多相混输泵的单个增压单元为研究对象。主要参数为:流量 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 2\,950 \text{ r/min}$, 叶轮进口直径 $D_1 = 161 \text{ mm}$, 叶轮出口直径 $D_2 = 161 \text{ mm}$, 叶轮叶片数 $Z_1 = 3$, 导叶叶片数 $Z_2 = 11$, 叶顶间隙为 1.5 mm 。多相混输泵流体域由进口延长段、叶轮、导叶和出口延长段组成,流体域模型如图 1 所示。

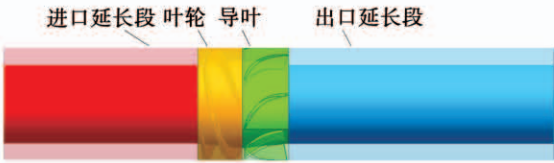


图 1 流体域模型
Fig.1 Fluid domain model

1.3 网格划分

随着模型网格数的增加,由网格引起的计算误差一般会逐渐缩小。采用 UG 软件对多相混输泵流体域进行三维几何建模,为了降低边界条件对计算精度的影响,在叶轮进口处和出口处做了适当的延伸。使用 ICEM CFD 软件,采用六面体网格划分技术,对进口段和出口段进行网格划分,采用 TurboGrid 软件对叶轮和导叶进行结构网格划分。为保证数值计算结果不受网格数量的影响,在流量 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 的清水工况下,采用 4 套网格数对模型进行数值计算,验证其网格无关性,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,随着网格数的增加,效率不断增加并趋于稳定,第 3 套网格与第 4 套网格之间效率改变小于 0.5% 。综合考虑计算硬件配置和计算时间的关系,选取第 3 套网格开展后续研究,流体域网格如图 2 所示。

表 2 网格无关性验证

Tab.2 Grid independence verification

方案	网格数/万	效率/%
1	103.6	36.40
2	211.3	36.99
3	282.1	37.00
4	534.3	37.17



图 2 流体域网格
Fig.2 Fluid domain grid

1.4 数学模型与边界条件

运用场分析软件 ANSYS CFX,采用 Particle 模型和非均相流模型,对多相混输泵内部流场进行数值计算。连续相采用 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 湍流模型,离散相采用零方程模型,相间曳力采用 Gidaspow 模型。代数方程迭代计算采取均方差残差值,设定收敛精度为 10^{-5} 。

计算域的进口采用速度进口条件,并设定进口处颗粒体积分数均匀分布;出口采用压力出口条件;过流部件内与固液两相接触的壁面为无滑移壁面条件。

2 计算结果与分析

2.1 颗粒体积分数对多相混输泵内速度分布的影响

图 3 为多相混输泵全流道内的颗粒运动路径。颗粒在进口段的流线平顺稳定,进入叶轮流道受到离心力作用,颗粒运动轨迹沿流道分布,较为稳定;旋转的流体进入静止的导叶流道后颗粒轨迹发生紊乱,出现旋涡;在出口段颗粒呈现螺旋运动。

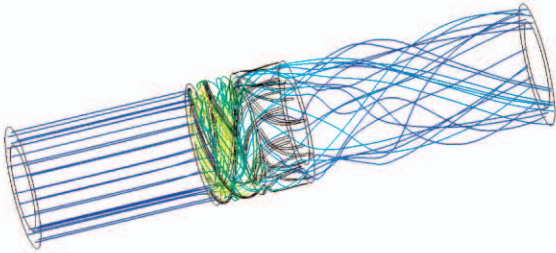


图 3 多相混输泵全流道内的颗粒运动路径
Fig.3 Particle movement path in full flow channel of the multiphase mixed pump

图 4 为不同颗粒体积分数下多相混输泵 0.5 倍叶高处的速度分布图。在多相混输泵 0.5 倍叶高处,不同颗粒体积分数下多相混输泵中液相速度大小和变化规律基本相同。液相在叶轮流道内流态较

为稳定,在导叶流道内较为紊乱,不同工况下都出现不同程度的旋涡。随着颗粒体积分数的增加,多相混输泵叶轮进口处速度变化较小,流速主要在 21.5 m/s 左右。从叶轮进口到出口速度逐渐降低,

而降低的动能主要转化为静压能。在颗粒体积分数为 5% 时,多相混输泵叶轮和导叶内旋涡最小,随着颗粒体积分数的增加,多相混输泵叶轮和导叶内轴向旋涡逐渐增大,强度逐渐增加。

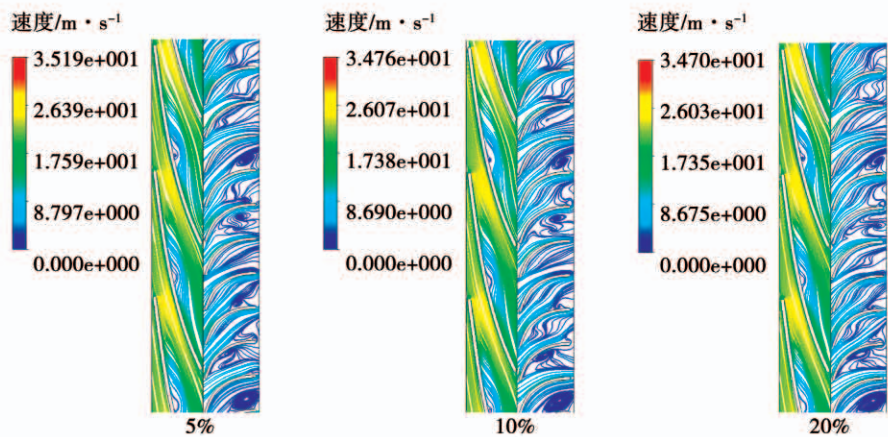


图 4 不同颗粒体积分数下多相混输泵 0.5 倍叶高处速度分布图

Fig.4 Velocity distribution cloud maps at half of blade height in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

2.2 颗粒体积分数对混输泵内颗粒分布的影响

图 5 为不同颗粒体积分数下多相混输泵 0.5 倍叶高处体积分数云图。

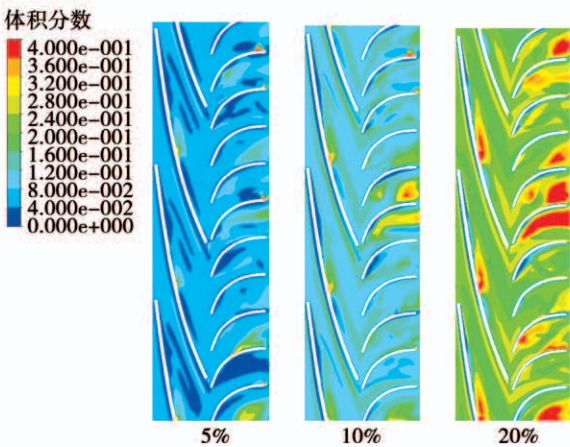


图 5 不同进口颗粒体积分数下多相混输泵 0.5 倍叶高处颗粒体积分数云图

Fig.5 Volume fraction distribution cloud maps at half of blade height in the multiphase mixed pump under different inlet particle volume fractions

在多相混输泵 0.5 倍叶高处,不同进口颗粒体积分数下多相混输泵内的颗粒体积分数分布规律基本相同。颗粒在叶轮流道内分布较为均匀,仅在叶片压力面中部附近出现颗粒聚集,因为叶片压力面

中部存在少量旋涡。当颗粒体积分数为 5% 时,颗粒在导叶内聚集现象不明显。随着进口颗粒体积分数的增加,当达到 20% 时,颗粒在导叶内聚集现象非常明显。因为导叶流道内存在大面积旋涡,固相颗粒被液相裹挟在旋涡之中,所以导叶内颗粒体积分数较大。导叶叶片压力面也出现少量颗粒聚集,原因是颗粒随着液相在叶轮流道内高速旋转,从叶轮出口进入导叶进口后,颗粒被液相裹挟着撞击导叶压力面。随着颗粒体积分数的增加,固液两相分离现象加剧,造成多相混输泵水力效率逐渐下降。

图 6 为进口颗粒体积分数 10% 时不同叶高处的颗粒体积分数分布云图。在叶轮流道内叶高从 0.1 倍增加到 0.5 倍时,颗粒由均匀分布到逐渐在流道中部聚集,而叶高增加至 0.9 倍时,颗粒体积分数减小,且仅在叶轮进口处和叶轮中部少量聚集。因为在 0.1 倍叶高时,叶轮内流线分布均匀,颗粒体积分数变化不大。随着叶高的增加,叶轮流道中部内出现旋涡,颗粒被液相裹挟着在叶轮流道内聚集。随着叶高继续增加,叶轮内旋涡强度逐渐减小,颗粒分布又趋于均匀。在导叶流道内随着叶高的增加,颗粒由于大面积聚集其体积分数减小。

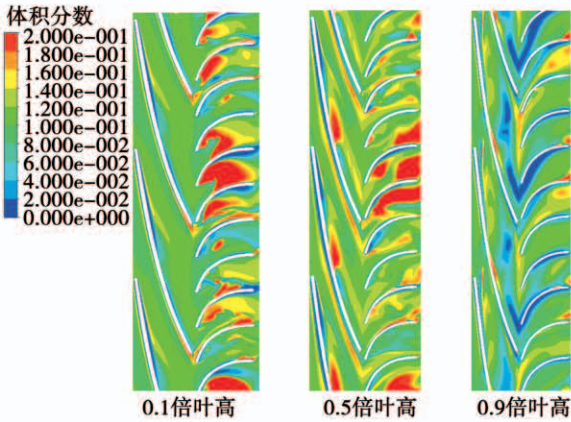


图 6 进口颗粒体积分数为 10% 时不同叶高处颗粒体积分数分布云图

Fig. 6 Particle volume fraction distribution cloud maps at different blade heights under 10% of particle inlet volume fraction

图 7 为不同颗粒体积分数下多相混输泵内各断面平均体积分数曲线图。从叶轮进口至导叶出口, 全长 $L = 130\text{ mm}$, 划分为 20 个轴向断面。从叶轮进口(0 mm)至导叶出口(130 mm)流道内, 颗粒体积分数总体变化趋势是逐渐增大。其中, 断面 13 mm 至断面 39 mm 的颗粒体积分数显著增大, 因为此处正是叶轮叶片压力面中部, 存在少量旋涡; 颗粒在导叶流道内的体积分数明显高于叶轮流道内, 因为导叶内存在大面积旋涡。

2.3 颗粒体积分数对叶轮和导叶叶片磨损的影响

颗粒的体积分数直接决定了颗粒对壁面的磨损

程度, 颗粒体积分数越大, 壁面磨损次数越多, 磨损越严重。图 8、图 9 为不同颗粒体积分数下多相混输泵叶轮叶片上的体积分数云图。在叶轮叶片压力面中部出现少量颗粒聚集, 在叶轮叶片吸力面颗粒分布比较均匀, 仅在叶轮叶片出口处现微量聚集。当颗粒体积分数小于 10% 时, 固液两相流运动主要由液相作用控制, 忽略了颗粒间的碰撞力对颗粒分布的影响。但当颗粒体积分数大于 10% 时, 不能忽略颗粒间的碰撞力, 所以固液两相运动主要由液相作用和颗粒间碰撞力共同作用。随着颗粒体积分数的增加, 叶轮叶片压力面进口处和出口处颗粒分布减少, 叶轮叶片中部的颗粒体积分数变化不大。

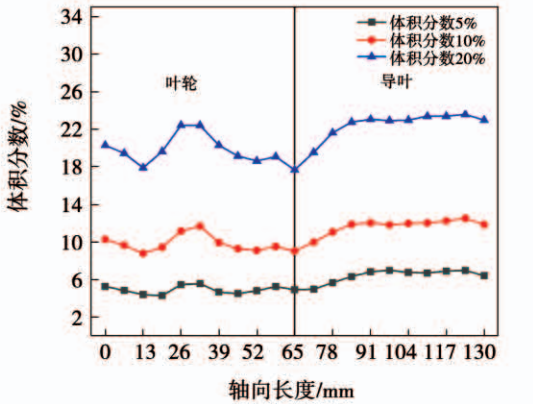


图 7 不同颗粒体积分数下多相混输泵内各断面平均体积分数曲线图

Fig. 7 Average volume fraction curves of all sections in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

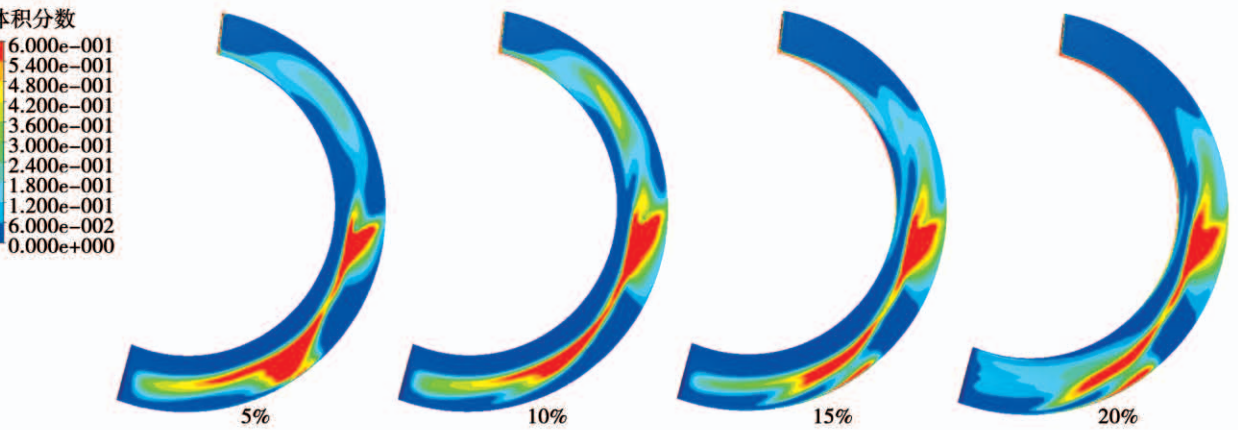


图 8 不同颗粒体积分数下多相混输泵叶轮叶片压力面的颗粒分布云图

Fig. 8 Particle distribution cloud maps on the pressure surface of impeller blade in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

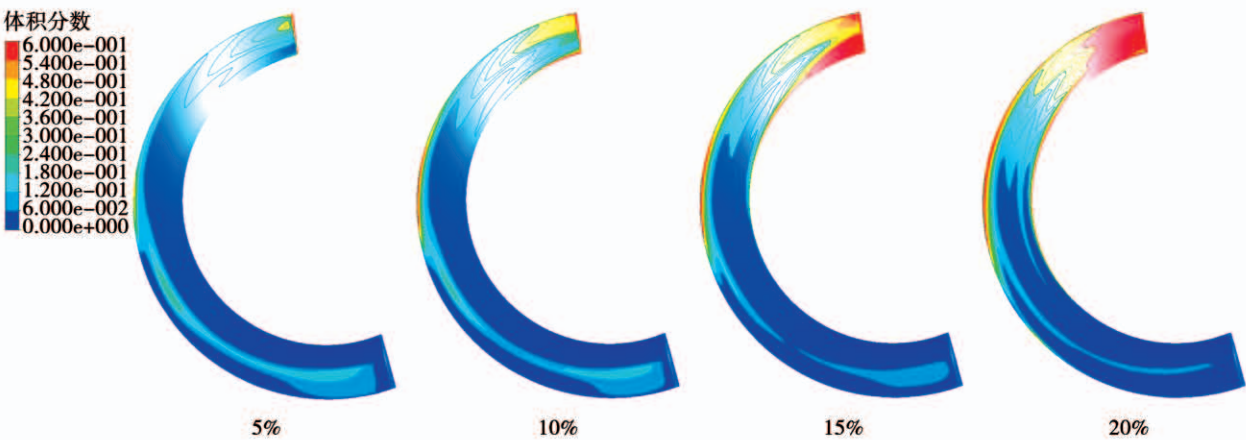


图 9 不同颗粒体积分数下多相混输泵叶轮叶片吸力面的颗粒分布云图

Fig. 9 Particle distribution cloud maps on the suction surface of impeller blade in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

颗粒聚集主要发生在叶轮叶片吸力面尾部,在颗粒体积分数为 5% 时,吸力面尾部只有微小的颗粒现象,随着颗粒体积分数的增加,尾部壁面的颗粒体积分数逐渐增加,颗粒体积分数达到 20% 时,吸力面尾部出现相当大面积的颗粒聚集,导致此处壁面磨损较为严重;在叶轮叶片吸力面头部和中部基本没有颗粒聚集,所以此处壁面情况较好。

图 10、图 11 为不同颗粒体积分数下多相混输

泵导叶叶片上的体积分数分布云图。颗粒聚集在导叶叶片压力面头部和靠近轮毂的中部,随着进口颗粒体积分数增加,此处壁面颗粒体积分数也逐渐增加,壁面的磨损较为严重;导叶叶片中部颗粒聚集不明显;固液两相进入叶轮内,高速旋转的叶轮对其做功,固液两相流获得能量,以一定的冲角进入导叶,因此固液两相流冲击导叶压力面头部,导致导叶叶片压力面颗粒聚集明显。

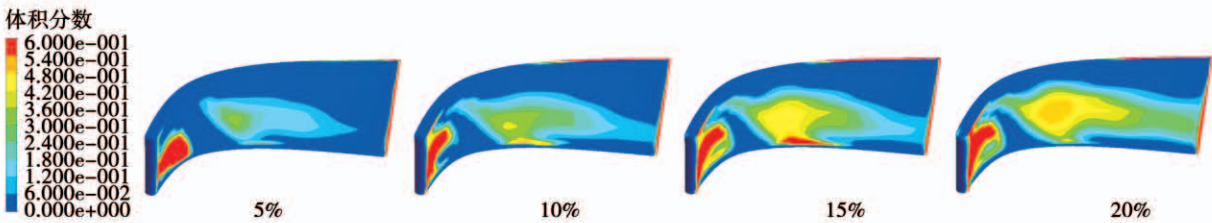


图 10 不同颗粒体积分数下多相混输泵导叶叶片压力面的颗粒分布云图

Fig. 10 Particle distribution cloud maps on the pressure surface of guide vane in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

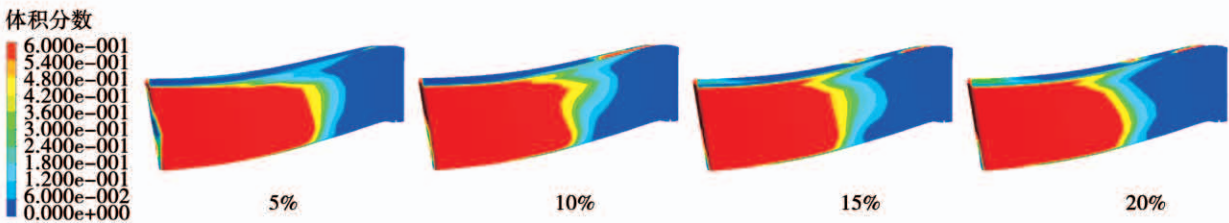


图 11 不同颗粒体积分数下多相混输泵导叶叶片吸力面的颗粒分布云图

Fig. 11 Particle distribution cloud maps on the suction surface of guide vane in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

颗粒主要聚集在导叶吸力面中部,随着颗粒体积分数的增加,导叶吸力面中部颗粒体积分数逐渐增加,并且颗粒体积分数逐渐向出口处扩大,此处壁面的磨损较为严重。因为固液两相流经过叶轮做功,获得机械能,而经过静止的导叶流道后,在导叶叶片吸力面中部附近出现旋涡,颗粒聚集在此处。

2.4 颗粒体积分数对多相混输泵外特性的影响

图 12 为不同颗粒体积分数下多相混输泵内的扬程和效率曲线图。随着进口颗粒体积分数的增加,泵的扬程和效率均逐渐降低。扬程从 5% 颗粒体积分数时的 5.6 m 逐渐下降至 20% 颗粒体积分数时的 5.27 m;效率从 5% 颗粒体积分数时的 35.57% 逐渐下降至 20% 颗粒体积分数时的 33.89%。说明固体颗粒的增加对多相混输泵扬程和效率的增加均有阻碍作用。

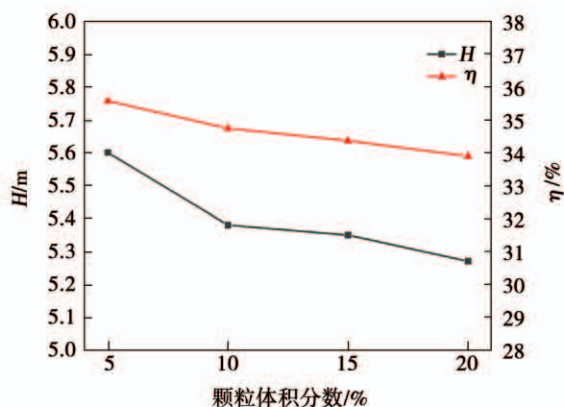


图 12 不同颗粒体积分数下多相混输泵扬程和效率曲线图

Fig. 12 The head and efficiency curves in the multiphase mixed pump under different particle volume fractions

3 结 论

(1) 液相在叶轮流道内流态较为稳定,在导叶流道内较为紊乱,不同颗粒物体积分数下都出现不同程度的旋涡。当颗粒体积分数为 5% 时,多相混输泵叶轮和导叶内旋涡最小,随着颗粒体积分数的增加,多相混输泵叶轮和导叶内轴向旋涡逐渐增大,强度逐渐增强。

(2) 颗粒在叶轮流道内分布较为均匀,仅在叶片压力面中部附近出现聚集现象。随着颗粒体积分

数的增加,由于导叶内较大的旋涡导致颗粒在导叶内出现明显的聚集现象;同时,随着颗粒体积分数的增加,固液两相分离现象加剧,造成多相混输泵扬程和效率均逐渐降低,说明固体颗粒的增加对多相混输泵扬程和效率的增加均有阻碍作用。

(3) 随着颗粒体积分数的增加,在叶轮叶片压力面进口处和出口处颗粒分布逐渐减小,而中部整体变化不大;在叶轮叶片吸力面,颗粒聚集主要发生在吸力面尾部,随着进口颗粒体积分数的增加,尾部壁面的颗粒体积分数逐渐增加,当颗粒体积分数达到 20% 时,吸力面尾部出现大面积的颗粒聚集,易导致此处壁面磨损较为严重;在导叶上,颗粒主要聚集在叶片吸力面前半部分,且其分布区域远大于压力面,即导叶吸力面更易受到磨损。

参考文献:

- [1] 周守为,陈 伟,李清平.深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术[J].中国海上油气,2014,26(5):1-7.
ZHOU Shou-wei, CHEN Wei, LI Qing-ping. The green solid fluidization development principle of natural gas hydrate stored in shallow layers deep water[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 1-7.
- [2] 史广泰,王志文.多相混输泵叶轮不同区域增压性能[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):13-17.
SHI Guang-tai, WANG Zhi-wen. Pressurization performance of different areas within multiphase pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2019, 37(1): 13-17.
- [3] 史广泰,王 闪,姚显彤,等.空化对多相混输泵内流动特性的影响[J].水电能源科学,2020,38(5):156-159.
SHI Guang-tai, WANG Shan, YAO Xian-tong, et al. Effect of cavitation on flow characteristic of mutiphase pump[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 156-159.
- [4] 史广泰,罗 琨,刘宗库,等.螺旋轴流式多相混输泵叶轮域的能量特性[J].排灌机械工程学报,2020,38(7):670-676.
SHI Guang-tai, LUO Kun, LIU Zong-ku, et al. Energy transfer characteristics of fluid in impeller of helical axial-flow multiphase pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2020, 38(7): 670-676.
- [5] 史广泰,王志文,罗 琨.油气混输泵压缩级内湍流强度及湍流耗散特性分析[J].热能动力工程,2018,33(6):115-121.
SHI Guang-tai, WANG Zhi-wen, LUO Kun. Analysis of the turbulent flow intensity and dissipation characteristics of an oil-gas mul-

- tipphase pump in its compression stages[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(6): 115–121.
- [6] SHI G. Energy conversion characteristics of multiphase pump impeller analyzed based on blade load spectra[J]. Renewable Energy, 2020(157): 9–23.
- [7] SHI G. Tip leakage vortex trajectory and dynamics in a multiphase pump at off-design condition[J]. Renewable Energy, 2020(150): 703–711.
- [8] SHI G. Velocity characteristics in a multiphase pump under different tip clearances[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2020: 095765092 094653.
- [9] SHI G. Velocity characteristics in a multiphase pump under different tip clearances[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2020: 95765092 094653.
- [10] 苗长山, 李增亮, 赵新学, 等. 多相混输泵的数值模拟及与实验结果对比[J]. 石油机械, 2007, 35(11): 1–4.
MIAO Chang-shan, LI Zeng-liang, ZHAO Xin-xue, et al. Comparison between numerical simulation and experimental results of the multiphase pump[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(11): 1–4.
- [11] 李长俊, 黄婷, 贾文龙. 深水天然气水合物及其管道输送技术[J]. 科学通报, 2016, 61(22): 2449–2462.
LI Chang-jun, HUANG Ting, JIA Wen-long. A review of natural gas hydrates and its pipeline transportation technologies in deep water[J]. Science China Press, 2016, 61(22): 2449–2462.
- [12] 罗丹. 天然气水合物流态化分解及多相流动特性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
LUO Dan. Study on the decomposition of natural gas hydration and its multiphase flow characteristics[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [13] 曾义聪, 许海良, 谢秋敏, 等. 深海天然气水合物管道水力提升规律研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(2): 164–170.
ZENG Yi-cong, XU Hai-liang, XIE Qiu-min, et al. Research on submarine gas hydrate law in pipe hydraulic lifting[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(2): 164–170.
- [14] 刘艳军, 唐孝蓉, 胡坤. 天然气水合物浆体分解对其在垂直管道中流动特性影响的研究[J]. 化学通报, 2018, 81(3): 267–273.
- LIU Yan-jun, TANG Xiao-rong, HU Kun. Study on flow characteristics of natural gas hydrate slurry with decomposition in vertical tube[J]. Chemistry Bulletin, 2018, 81(3): 267–273.
- [15] 赵鹏飞, 王武昌, 李玉星, 等. 管道内水合物浆流动的数值模拟[J]. 油气储运, 2016, 35(3): 272–277.
ZHAO Peng-fei, WANG Wu-chang, LI Yu-xing, et al. Numerical model of hydrate slurry flow in pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(3): 272–277.
- [16] 刘建瑞, 徐永刚, 王董梅, 等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 86–90.
LIU Jian-rui, XU Yong-gang, WANG Dong-mei, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 86–90.
- [17] 林鹏, 刘梅清, 燕浩, 等. 轴流泵固液两相数值模拟及磨损特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 32–36.
LIN Peng, LIU Mei-qing, YAN Hao, et al. Research on numerical simulation and wear characteristics of solid-liquid two-phase of axial-flow pump[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(3): 32–36.
- [18] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 53–60.
WANG Jia-qiong, JIANG Wang-min, KONG Fan-yu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow and wear characteristics of centrifugal pump[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 53–60.
- [19] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 7–12.
ZHAO Bin-juan, YUAN Shou-qi, LIU Hou-lin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 7–12.

(丛敏编辑)