



气液两相条件下叶片开孔对电潜泵性能和内部流场的影响

王通¹, 王健^{2,3}, 施卫东⁴, 韩勇², 周岭^{2*}

(1. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459; 2. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 3. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261000; 4. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)



王通

摘要: 为了研究电潜泵内部流动机理, 从而改善高含气工况下电潜泵的气液混输性能, 文中基于欧拉-欧拉非均相流模型, 对不同入口含气率工况下叶片开孔前后的气液两相流动特性进行了数值模拟分析, 探究了气液两相流条件下叶片开孔对电潜泵性能和内部流场的影响。结果表明, 在纯水工况以及低含气率、小流量工况下, 叶片开孔会降低电潜泵性能; 但是叶片开孔可以改善电潜泵在大流量下的气液混输性能。叶片开孔后会改变叶轮内部压力分布, 使电潜泵叶轮内部平均压力升高, 进而改善叶轮内部流态。叶片开孔后会冲散气相聚集, 使气体分布更加均匀, 叶轮流道内涡核分布明显减少, 减少了能量耗散。该研究为改善电潜泵气液混输性能提供了理论依据。

关键词: 电潜泵; 叶片开孔; 气液两相流; 数值模拟; 涡核分布

中图分类号: TE53; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2024)06-0548-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.22.0311

王通, 王健, 施卫东, 等. 气液两相条件下叶片开孔对电潜泵性能和内部流场的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 548-555.

WANG Tong, WANG Jian, SHI Weidong, et al. Effect of blade perforation on performance and internal flow field of electric submersible pump under gas-liquid two-phase conditions[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2024, 42(6): 548-555. (in Chinese)

Effect of blade perforation on performance and internal flow field of electric submersible pump under gas-liquid two-phase conditions

WANG Tong¹, WANG Jian^{2,3}, SHI Weidong⁴, HAN Yong², ZHOU Ling^{2*}

(1. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China; 2. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. Weichai Power Co., Ltd., Weifang, Shandong 261000, China; 4. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract: In order to study the internal flow mechanism of the electric submersible pump, so as to improve the gas-liquid mixing performance of the electric submersible pump under high gas content conditions, numerical simulation based on the Eulerian-Eulerian non-homogeneous flow model was carried out to analyze the gas-liquid two-phase flow characteristics before and after the blade perforation. The effect of blade perforation on the performance and internal flow field of the electric submersible pump under the conditions of gas-liquid two-phase flow was investigated. The results show that in pure water environment, the blade perforation reduces the performance of the electric submersible pump under low gas content and small flow rate condition. However, the blade perforation can improve the gas-liquid

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-04-20; 网络出版时间: 2024-05-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20240522.1040.006>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979138); 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20230011)

第一作者简介: 王通(1987—), 男, 宁夏中宁人, 高级工程师(wangtong3@cosl.com.cn), 主要从事稠油开采和人工举升研究。

通信作者简介: 周岭(1986—), 男, 河南南阳人, 研究员(lingzhou@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械内流机理研究。

mixing performance of the electric submersible pump under large flow rate. Blade perforation changes the pressure distribution inside the impeller, so that the average pressure inside the impeller of the electric submersible pump rises, thus improving the flow pattern inside the impeller. Blade perforation also disperses the gas-phase aggregation and makes the gas distribution more uniform. As a result, the distribution of vortex core in the impeller channel is significantly reduced, which reduces the energy dissipation. This study provides a theoretical basis for the subsequent improvement of the gas-liquid mixing performance of the electric submersible pump.

Key words: electric submersible pump; blade perforation; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation; vortex core distribution

石油和天然气在世界工业及经济发展中扮演着重要的角色^[1-2].电潜泵凭借举升扬程高、适应流量范围广、运行稳定等优点被广泛应用于石油和地热等自然资源开发中^[3-4].在石油开采过程中,经常有气体掺杂于原油中,易导致电潜泵扬程、效率等性能指标下降.同时,随着全球原油储量的不断减少,原油的开采成本及技术难度不断增加^[5].因此提高电潜泵在气液两相流工况下的输送性能对于节能降耗、保障能源燃料稳定供给尤为重要.

为了提高气液两相工况下泵的性能,众多学者采用数值模拟和试验的方法对泵内气液两相流动规律进行了研究,为改善气液混输性能提供了有力的理论支撑.CARIDAD等^[6]采用双流体模型对电潜泵内部气液两相流进行了研究,通过改变流量和气泡直径,分析了叶轮流道内气相和液相分布.研究表明,含气工况下的性能下降是由于叶轮流道内气体聚集造成的,气相聚集现象主要出现在叶片压力面,气相含量越大气相聚集越明显,进而造成泵扬程降低.BARRIOS等^[7]采用可视化模型和高速摄影对电潜泵气液两相流特性进行了试验研究,发现在高含气时气体聚集在叶片压力面一侧,造成电潜泵的性能下降,由此推断出可以通过减小气相聚集面积来提高性能.ZHANG等^[8]对三级电潜泵进行数值计算及试验验证,发现气泡尺寸与扬程下降有较强关联性.ZHOU等^[9]对离心泵内部气液两相流动进行了数值模拟,发现泵的性能曲线随着气相含量的增加而下降.方欣^[10]研究了气液两相条件下电潜泵的性能,发现气液比越大时泵性能越差,气相在流道内表现出周期性的聚集、扩散.张开辉^[11]对气液混输离心泵研究发现,随着进口含气率的增加,泵的扬程和效率都有所降低,并且含气率越高,性能下降越快,气相主要聚集在叶轮叶片吸力面的中部以及叶片出口边缘.

此外,部分学者将研究聚焦于电潜泵入口处,

即通过增设油气分离器来减少泵内气相聚集.万邦烈^[12]通过在电潜泵入口处装设油气分离器使气相聚集减弱,从而提高了电潜泵性能.吴绍伟等^[13]在应用塔式泵设计理念的基础上设计了一种新型塔式电潜泵,同时使用油气分离器,大幅度提升了泵处理气体的能力.李京瑞等^[14]通过在气液混合器的叶片上开孔,发现选择合适的开孔孔径和开孔位置有利于气泡破碎,可以提高泵的性能.近年来大部分学者通过改进电潜泵结构设计来提升其性能.SHI等^[15]把普通叶轮的叶片设计成分流叶片并对2种不同叶轮进行数值模拟计算,研究表明,采用分流叶片后,叶轮流道内气相聚集面积减小,电潜泵性能得到提高.WANG等^[16]对具有不同长短叶片布置的叶轮进行数值模拟计算,研究表明,当短叶片越接近于长叶片的吸力面时,长叶片附近的气相聚集面积越小,叶轮内的流动状态改善越显著.张金亚等^[17]为改善叶片式混输泵的气液混输性能,提出了3种改进的叶轮并分别进行了数值计算,研究发现在叶片上开孔会显著提高气液混合程度.谭晶晶^[18]对电潜泵叶片进行开缝设计,开缝后的叶片会在高含气区域产生射流造成气泡破碎,进而提高了电潜泵气液混输性能.

上述研究表明,气液两相条件下通过叶片优化提高电潜泵性能主要集中在采用分流叶片和开缝叶片,且取得一定成效.文中对电潜泵叶片进行开孔,基于欧拉-欧拉非均相流模型,进行单级电潜泵叶片开孔前后不同含气率下流场仿真计算,探究叶片开孔对气液两相工况下外特性和内部流动的影响,为后续优化此类电潜泵提供理论依据.

1 计算模型及网格划分

1.1 计算模型

选取单级电潜泵为研究对象,其各项设计参数

中,设计流量 $Q_{des} = 140.00 \text{ m}^3/\text{d}$,单级扬程 $H_{des} = 5.79 \text{ m}$,额定转速 $n = 2\,917 \text{ r}/\text{min}$,叶片数 $Z = 6$,叶轮进口直径为 35.60 mm ,叶轮出口直径为 78.80 mm .计算模型由进口、叶轮、导叶、腔体和出口组成.为了使进、出口流动充分发展,对进、出口段长度进行了适当延长,分别为叶轮进口外径的 5 倍和 10 倍.采用 UG NX 软件对整体计算区域进行建模,如图 1 所示.

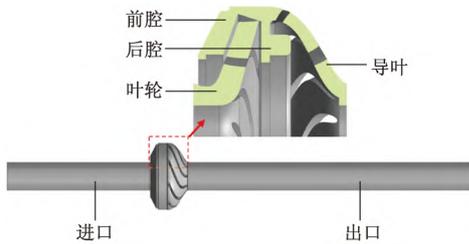


图 1 单级计算域装配图

Fig.1 Assembly drawing of single level computing domain

1.2 计算域网格划分及无关性验证

采用 ICFEM 19.0 软件进行计算域的结构化网格划分,在 CFD 计算中,网格对于求解精度及求解速度影响较大,因此对叶片附近进行加密处理,并保证所有网格质量在 0.2 以上,图 2 为计算域网格.

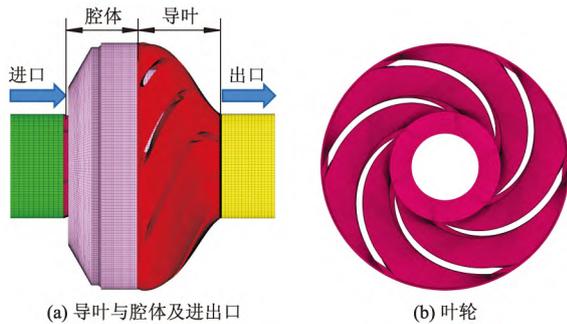


图 2 计算域网格划分

Fig.2 Grid division of computational domain

为了验证网格数量对数值计算的影响,划分了 5 组不同数量的网格并在设计流量下进行了仿真计算.随着网格数的增加,扬程趋于稳定,考虑到计算成本和精度,选择总网格数为 2 593 236 的方案进行仿真计算.

1.3 数值模拟方法

采用适用于泵内气泡流型的欧拉-欧拉非均相流模型,进行电潜泵气液两相流仿真计算^[19-20].两相介质分别为水和空气,液相为连续相,为 25 °C 的清水,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[21],湍流强度为 5%;其中气相为离散相,采用离散相零方程模型,气液

两相均设置为不可压缩流体^[22-24],相间传递方式采用粒子模型.设置入流气泡直径为 0.2 mm,并假定流动中气泡直径保持不变,气相表面张力系数为 0.073^[25].进、出口边界条件分别设置为参考压力进口、质量流量出口.固体壁面边界条件设为非滑移,近壁面采用标准壁面函数,收敛精度设置为 10^{-4} .

1.4 外特性试验及验证

为验证仿真计算的准确性,对单级电潜泵的实体模型进行了测试,外特性试验简图如图 3 所示.文中电潜泵的性能试验在开式电潜泵试验台上完成.试验台配有 ZNX-AK 流量计,测量精度: $\pm 0.1\%$;SGDN 扭矩仪,测量精度: $\pm 0.5\%$.叶轮和导叶均选用不锈钢材料精铸制成,以保证模型的尺寸精度.

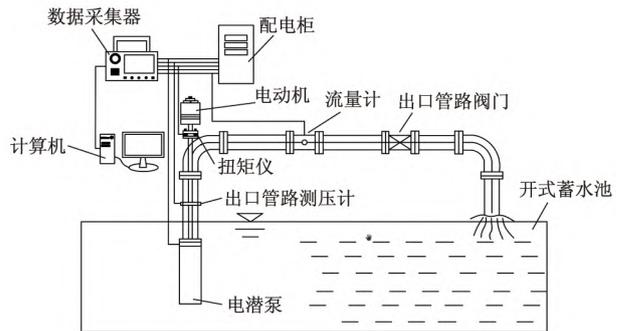


图 3 外特性试验简图

Fig.3 Sketch of hydraulic characteristic test

根据最终选定的网格划分方案和湍流模型,对单级电潜泵进行了纯水工况仿真计算,图 4 所示为额定转速和额定流量下单级电潜泵的试验性能和数值模拟的预测特性对比.图中 H 为扬程, η 为效率, P 为功率.

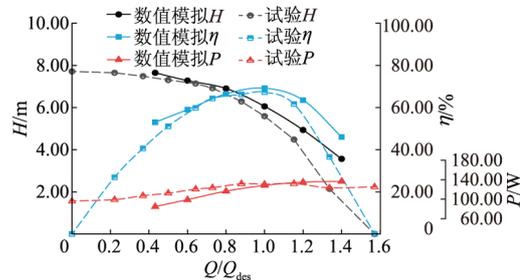


图 4 电潜泵外特性试验与模拟结果对比

Fig.4 Comparison of test and simulation results of hydraulic characteristics of electric submersible pumps

由于数值模拟计算中忽略了平衡孔和进口口环间隙,因此其扬程高于试验得到的扬程.同时模拟计算时忽略了部分容积损失和机械损失,如传动损失、摩擦损失,导致数值模拟得到的轴功率与试验

存在一定误差.但总体上,模拟预测的电潜泵扬程、效率和轴功率的变化趋势与性能测试结果基本一致,说明文中的数值计算结果基本可靠,选用的数值计算方法精度较高.

2 叶片开孔对电潜泵气液两相影响

对叶片开孔和不开孔的电潜泵方案分别在3个工况点($0.6Q_{des}$, $1.0Q_{des}$, $1.4Q_{des}$),入口含气率为1%,3%,5%进行了气液两相数值模拟计算.孔的主要参数:孔中心距叶片中心的距离 $R=27.5$ mm;孔径 $D=5$ mm;叶片开孔角 $\beta=60^\circ$,开孔后的叶轮水体如图5所示.

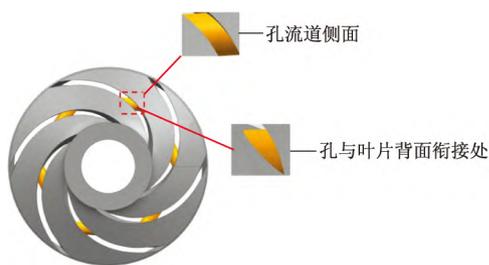


图5 叶片开孔后叶轮水体图

Fig.5 Impeller water body diagram after blade perforation

2.1 叶片开孔前后外特性变化对比

图6,7分别为叶片开孔前后不同入口含气率时

电潜泵扬程、效率、功率随流量的变化曲线,图中 α 为含气率.从图中可以看出,在相同的入口含气率条件下,叶片开孔前后的电潜泵外特性的变化趋势一致,扬程都是随着流量增大而下降,效率随着流量的增大先上升后下降并在 $1.0Q_{des}$ 达到最大值,功率随着流量的增大而增大,外特性的变化趋势与纯水工况下趋势较为相似.当输送含气液体时,原电潜泵和叶片开孔电潜泵的扬程、效率和功率都有明显下降,入口含气率越大,2种电潜泵的扬程、效率、功率下降越显著.当入口含气率为1%时,叶片开孔后在全流量下的扬程、效率和功率均小于原模型;当入口含气率为3%时, $0.6Q_{des}$ 和 $1.0Q_{des}$ 的工况下扬程、效率、功率要小于原模型,但当流量增大到 $1.4Q_{des}$ 时,叶片开孔电潜泵的扬程、效率和功率均高于原模型,扬程、效率和功率的增量分别为0.20 m, 1.04%, 1.74 W,当流量从 $1.0Q_{des}$ 增大到 $1.4Q_{des}$ 时,原方案和叶片开孔后的扬程下降幅度分别为63%和57%,因此叶片开孔后电潜泵的扬程下降速率相较于原模型有所减缓;当入口含气率增大到5%时,2种方案的外特性变化与入口含气率为3%的情况下相似,在 $1.4Q_{des}$ 的工况下扬程、效率、功率的增量分别为0.66 m, 3.90%和4.02 W,说明入口含气率越大,在大流量下叶片开孔后的外特性的增长幅度越大.

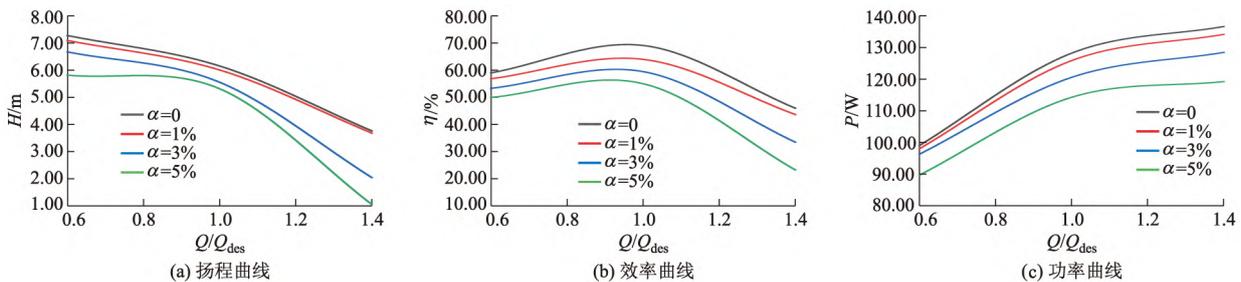


图6 叶片不开孔电潜泵外特性曲线

Fig.6 Hydraulic characteristic curves of electric submersible pump with non-perforated blade

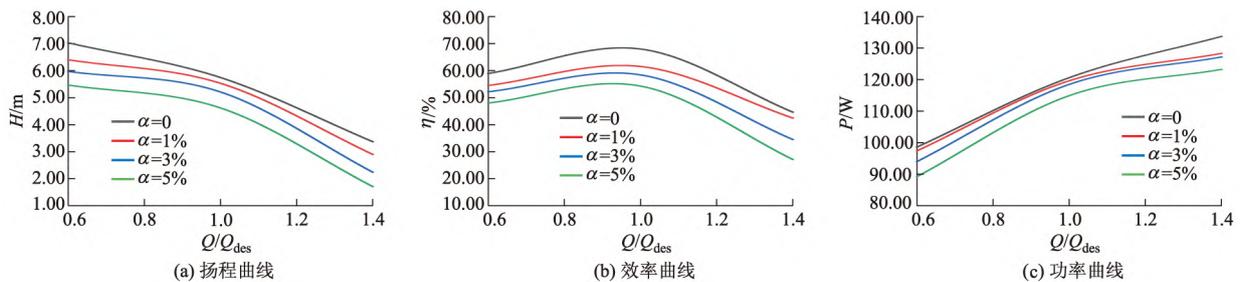


图7 叶片开孔电潜泵外特性曲线

Fig.7 Hydraulic characteristic curves of electric submersible pump with perforated blade

综上所述,通过对比不同入口含气率工况下电潜泵的外特性曲线可以得出,当入口含气率增大

时,电潜泵的扬程随着流量的增大而减小,效率随着流量的增大先增加后下降,功率随着流量的增大而增大.不仅如此,观察外特性曲线可知,入流含气条件下电潜泵的扬程、效率、功率都有较大幅度的降低,且随着入口含气率的增大进一步降低.根据叶片开孔前后电潜泵外特性数值对比可以得出,叶片开孔后电潜泵在高含气率、大流量工况下会提高电潜泵的性能,且入口含气率越大提升效果越显著,而在较小的入口含气率和小流量设计工况下会降低电潜泵的性能,因此推荐在高含气率、大流量条件下采用叶片开孔式电潜泵.

2.2 叶片开孔前后电潜泵内流场对比分析

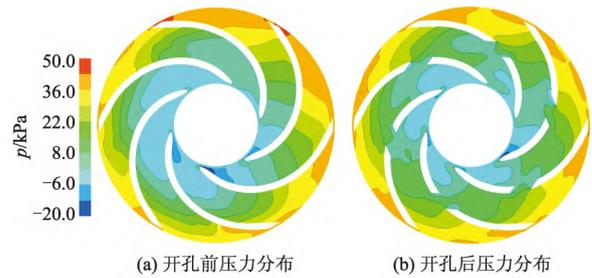
为了进一步探究叶片开孔对电潜泵性能的影响,对比分析入口含气率为5%的工况下原电潜泵与叶片开孔电潜泵在 $0.6Q_{des}$ 、 $1.0Q_{des}$ 和 $1.4Q_{des}$ 工况下内部流动特征.选取叶轮中间截面的压力分布、气相体积分数分布以及涡核分布进行对比研究.

2.2.1 压力分布

叶轮中间截面压力 p 分布如图8—10所示,由图可知,叶片开孔前后电潜泵的压力分布有许多相似之处,即从叶轮进口处到叶轮出口处压力逐渐增大,叶轮出口位置压力达到最大,压力最小的位置处于叶轮进口处,叶轮出口处都出现不同程度的高压区,进口处都出现不同程度的低压区.在相同的半径位置叶轮工作面的压力要大于背面的压力.在 $0.6Q_{des}$ 、 $1.4Q_{des}$ 工况下,随着流量的增大,叶轮内部平均压力增大,这是因为流量较小时,流体进入的进口冲角较小,易产生分离涡,当流量增大时,流体进入的进口冲角变大,此时分离涡影响范围减小,产生的低压区范围也减小.叶片开孔前后电潜泵内部压力分布也有许多不同之处,相较于原未开孔方案,开孔后电潜泵内部压力分布不均,由于流体在流入叶轮时流体方向发生突然改变,且开孔后流体经过孔后产生高速射流,造成工作面靠近孔的位置出现低压区,使背面出现部分高压区,但背面产生的高压区的压力要小于工作面产生的低压区压力.在 $1.0Q_{des}$ 工况下,原电潜泵非设计工况较叶轮中间截面的压力分布更为均匀,且叶轮流道内未出现大面积的低压区.电潜泵开孔后,流体在叶轮流道内流动方向发生改变使叶轮流道内压力的分布发生变化,孔在工作面的衔接位置会出现低压区.

综上所述,叶轮开孔前后压力最大和最小的位置相同,在偏工况下叶轮开孔后会改善叶轮流道内的压力分布,会使叶轮内部平均压力增大,使叶轮

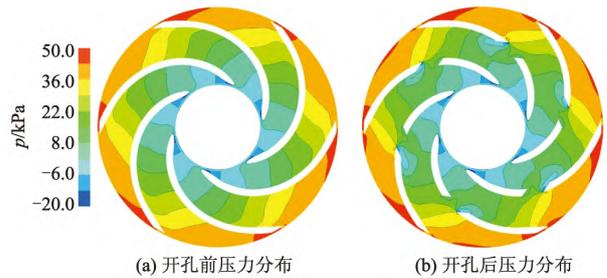
流道中间位置压力升高,进而改善叶轮流道内部流动和电潜泵的气液混输特性.



(a) 开孔前压力分布 (b) 开孔后压力分布

图8 $0.6Q_{des}$ 工况下压力分布

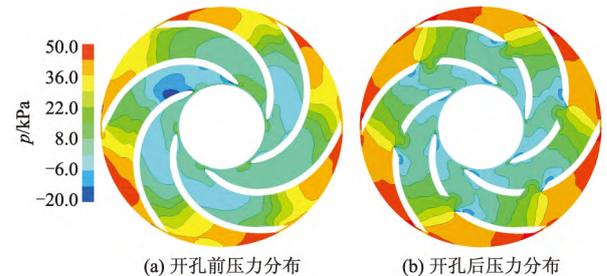
Fig.8 Pressure distribution under working condition of $0.6Q_{des}$



(a) 开孔前压力分布 (b) 开孔后压力分布

图9 $1.0Q_{des}$ 工况下压力分布

Fig.9 Pressure distribution under working condition of $1.0Q_{des}$



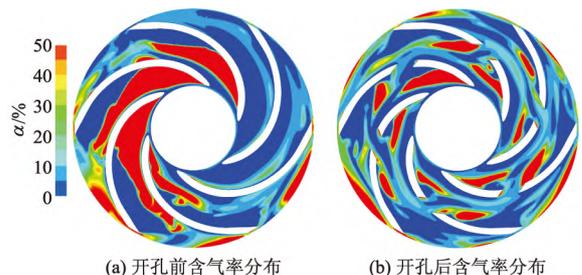
(a) 开孔前压力分布 (b) 开孔后压力分布

图10 $1.4Q_{des}$ 工况下压力分布

Fig.10 Pressure distribution under working condition of $1.4Q_{des}$

2.2.2 含气率分布

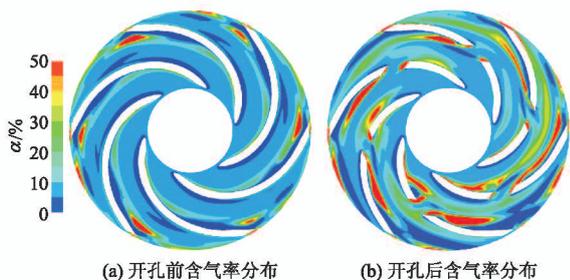
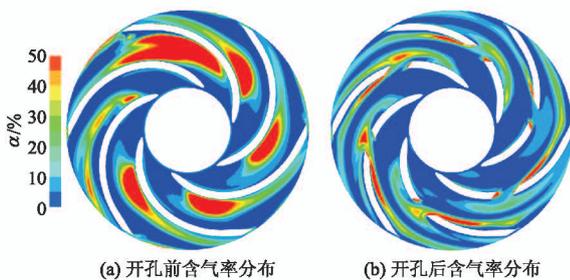
叶轮中间截面在不同流量下的含气率分布如图11—13所示.



(a) 开孔前含气率分布 (b) 开孔后含气率分布

图11 $0.6Q_{des}$ 工况下含气率分布

Fig.11 Gas volume fraction distribution under working condition of $0.6Q_{des}$

图 12 $1.0Q_{des}$ 工况下含气率分布Fig.12 Gas volume fraction distribution under working condition of $1.0Q_{des}$ 图 13 $1.4Q_{des}$ 工况下含气率分布Fig.13 Gas volume fraction distribution under working condition of $1.4Q_{des}$

由图可知,原电潜泵在大流量和小流量工况下都会使部分气体在叶轮流道内产生聚集,但在设计工况下气体聚集程度较其他2种工况有所改善,但低含气率面积占比较小.在 $0.6Q_{des}$ 工况下,原电潜泵的叶轮流道进口处气相聚集较多,叶轮流道内出现了明显的气液流动分离现象,且叶轮部分单流道内高含气率区域面积占比较大,气体分布不均;叶片开孔后电潜泵叶轮流道内的气相主要分布在叶轮进口处、孔流道的侧面和孔与叶轮背面的衔接处,与原电潜泵相比,叶轮的单流道内没有大量气相聚集的现象,气体分布较不开孔电潜泵的气体分布更为均匀.在 $1.0Q_{des}$ 工况下,原电潜泵的气相主要分布在叶轮的出口且叶轮流道中高含气率区域面积有所减小,但仍有气相聚集现象;叶片开孔后电潜泵的气相分布在叶轮出口处、孔流道侧面和孔与叶轮背面衔接处,与小流量工况下相比,孔流道侧面气相聚集加剧,但孔与叶轮背面衔接处的气相聚集减少.在 $1.4Q_{des}$ 工况下,原电潜泵气相主要聚集在叶轮流道中间,且叶轮部分单流道内出现大量气体聚集的现象;叶片开孔后电潜泵的气相主要聚集在孔流道侧面和孔与叶轮背面衔接处,与原模型相比,叶轮流道中间位置并没有出现大量气体聚集的现象,与设计工况下相比,孔流道侧面高含气率面积增大,孔与叶轮背面衔接处高含气率面积减小.通过对

比3种不同流量下叶片开孔前后含气率分布,可以得到叶片开孔后会明显改善叶轮流道内气体聚集现象,但由于孔的流道面积较小,随着流量的增大会使部分气体堆积到孔流道内,可能会造成孔流道阻塞.

综上所述,在大流量和小流量工况下原电潜泵叶轮流道内有明显的气相聚集现象,足以阻碍叶轮流道内的流体流动,而通过对叶轮开孔来改变原电潜泵的叶轮流道,经过孔的流体会对另一侧聚集的流体产生冲击,使气体分布趋于均匀,减少气体聚集,因此开孔方案可以改善电潜泵的气液混输性能,从而输送更高气液比的流体.

2.2.3 涡核分布

Q 准则法是基于速度梯度张量不变量分析来研究流场中涡团结构,目前被广泛应用于分析流场内旋涡的产生、发展和演变规律^[26].为进一步分析变工况下叶片开孔前后涡核变化,选取阈值 $Q = 1\ 350\ s^{-1}$ 进行流场分析.图14—16对比了入口含气率为5%、不同流量工况下的叶轮开孔前后的涡核分布.可以看出,在小流量 $0.6Q_{des}$ 工况下,叶片开孔前涡核主要集中在叶轮流道中间位置,且各流道分布不均,部分流道内涡核尺度较大,叶片表面涡核较小.开孔后各个流道涡核分布较为均匀,主要集中在开孔位置的叶轮流道、孔内以及叶轮进出口和叶片表面;在设计流量 $1.0Q_{des}$ 下,叶片开孔前后较小流量时涡核尺度急剧衰减,开孔前仅在叶轮进口和叶片表面零星分布,但开孔后流道内流体流动的不稳定性加剧,叶片表面、叶轮进口以及开孔附近的叶轮流道处涡核尺度较开孔前有显著增大,孔内也有较大尺度的涡核,但相较于小流量工况,孔内以及开孔附近的叶轮流道内涡核尺度明显减小;在大流量 $1.4Q_{des}$ 下,较设计流量时涡核尺度发生显著的改变,开孔前后叶轮流道中部、叶片表面以及进口处均存在不同尺度的涡核,且叶轮流道中部存在大尺度涡,部分流道内涡核占据了大部分流道,开孔后叶轮流道中部大尺度涡核得到明显改善,但叶片表面以及进口处涡核数量显著增多,孔内涡核尺度较设计流量进一步减小.

综上所述,气液两相工况下叶片开孔前后,涡核数量及尺度随流量的增大先减小后增大,由小流量增长至设计流量时泵内流态稳定、能量耗散较小;而在大流量工况下,流速增大,冲击损失增强,致使能量损失加剧.在偏工况下,叶片开孔后叶轮流道内流态有所改善,在大流量工况时尤为显著.

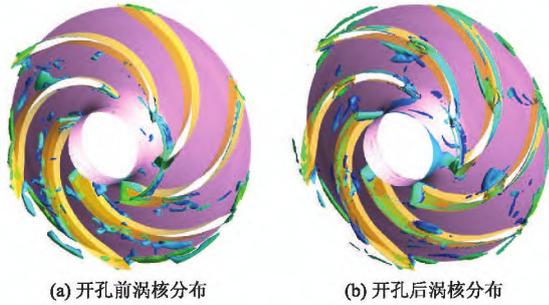


图 14 $0.6Q_{des}$ 工况下涡核分布
Fig.14 Vortex nucleus distribution under working condition of $0.6Q_{des}$

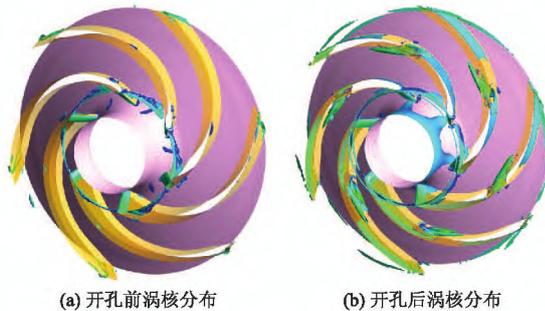


图 15 $1.0Q_{des}$ 工况下涡核分布
Fig.15 Vortex nucleus distribution under working condition of $1.0Q_{des}$

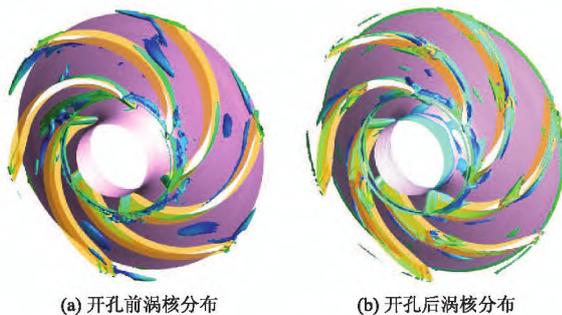


图 16 $1.4Q_{des}$ 工况下涡核分布
Fig.16 Vortex nucleus distribution under working condition of $1.4Q_{des}$

3 结 论

1) 在入口含气条件下,叶片开孔会使小流量工况和设计工况的电潜泵性能下降,但在高含气率、大流量工况下会显著提高电潜泵的性能。

2) 叶片开孔后会改变叶轮内部压力分布,使电潜泵叶轮内部平均压力升高,进而改善叶轮内部流态。

3) 在偏工况下,叶片开孔后会冲散气相聚集,使气体分布更加均匀,进而改善电潜泵的气液混输

性能,输送气液比更高的流体。

4) 在大流量工况下,叶片开孔后叶轮流道内涡核分布明显减少,能量耗散减少,对叶轮内部流态起到了改善作用。

参考文献(References)

- [1] AYDIN G. Production modeling in the oil and natural gas industry: an application of trend analysis [J]. Petroleum science and technology, 2014, 32(5): 555-564.
- [2] AZADEH A, TARVERDIAN S. Integration of genetic algorithm, computer simulation and design of experiments for forecasting electrical energy consumption [J]. Energy policy, 2007, 35(10): 5229-5241.
- [3] AYDIN H, MEREY S. Design of electrical submersible pump system in geothermal wells: a case study from West Anatolia, Turkey [J]. Energy, 2021, 230: 120891.
- [4] BULGARELLI N A V, BIAZUSSI J L, VERDE W M, et al. Experimental investigation on the performance of electrical submersible pump (ESP) operating with unstable water/oil emulsions [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2021, 197: 107900.
- [5] YANG Y, ZHOU L, ZHOU H, et al. Optimal design of slit impeller for low specific speed centrifugal pump based on orthogonal test [J]. Journal of marine science and engineering, 2021, 9(2): 121.
- [6] CARIDAD J, KENYERY F. CFD analysis of electric submersible pumps (ESP) handling two-phase mixtures [J]. Journal of energy resources technology, 2004, 126(2): 99-104.
- [7] BARRIOS L J. Visualization and modeling of multiphase performance inside an electrical submersible pump [D]. Tulsa: University of Tulsa, 2007.
- [8] ZHANG J, CAI S, LI Y, et al. Visualization study of gas-liquid two-phase flow patterns inside a three-stage rotodynamic multiphase pump [J]. Experimental thermal and fluid science, 2016, 70: 125-138.
- [9] ZHOU L, HAN Y, LYV W, et al. Numerical calculation of energy performance and transient characteristics of centrifugal pump under gas-liquid two-phase condition [J]. Micromachines, 2020, 11(8): 728.
- [10] 方欣. 电潜泵气液两相流瞬态特性数值分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [11] 张开辉. 气液条件下离心泵的气相分布特性分析及性能预测 [J]. 广东水利水电, 2022(1): 66-76. ZHANG Kaihui. Analysis of gas phase distribution characteristics and performance prediction of centrifugal

- pumps under gas-liquid conditions [J]. Guangdong water conservancy and hydropower, 2022(1): 66-76. (in Chinese)
- [12] 万邦烈. 电动潜油泵的发展前景 [J]. 石油钻采机械通讯, 1979, 4: 1-14.
WAN Banglie. Prospects for the development of electric submersible oil pumps [J]. Petroleum drilling machinery newsletter, 1979, 4: 1-14. (in Chinese)
- [13] 吴绍伟, 万小进, 袁辉, 等. 高气油比条件下潜油电泵气体处理新技术研究 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2015, 18(3): 90-93.
WU Shaowei, WAN Xiaojin, YUAN Hui, et al. Research on new gas treatment technology for submerged oil electric pumps under high gas-oil ratio conditions [J]. Journal of Chongqing Institute of Science and Technology (natural science edition), 2015, 18(3): 90-93. (in Chinese)
- [14] 李京瑞, 颜廷俊, 张白茹. 叶轮开孔对高效气液混合器性能的影响 [J]. 石油机械, 2017, 45(8): 76-81.
LI Jingrui, YAN Tingjun, ZHANG Bairu. Effect of impeller opening on the performance of high-efficiency gas-liquid mixer [J]. Petroleum machinery, 2017, 45(8): 76-81. (in Chinese)
- [15] SHI Y, ZHU H, YIN B, et al. Numerical investigation of two-phase flow characteristics in multiphase pump with split vane impellers [J]. Journal of mechanical science and technology, 2019, 33(4): 1651-1661.
- [16] WANG B, ZHANG H, DENG F, et al. Effect of short blade circumferential position arrangement on gas-liquid two-phase flow performance of centrifugal pump [J]. Processes, 2020, 8(10): 1317.
- [17] 张金亚, 朱宏武, 徐丙贵, 等. 高含气率下增强叶轮内气液均匀混合的方法 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 641-645.
ZHANG Jinya, ZHU Hongwu, XU Binggui, et al. A method to enhance the uniform mixing of gas and liquid in impeller with high gas content [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(6): 641-645. (in Chinese)
- [18] 谭晶晶. 新型电潜泵开缝叶片设计及气液混输性能分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [19] 张开辉. 气液混输泵导流腔改型及内部两相流动特性数值研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [20] ZHU J, ZHANG H Q. Numerical study on electrical-submersible-pump two-phase performance and bubble-size modeling [J]. SPE production & operations, 2017, 32(3): 267-278.
- [21] SPEZIALE C, ABID R, ANDERSON E. Critical evaluation of two-equation models for near-wall turbulence [J]. AIAA journal, 1992, 30(2): 324-331.
- [22] SHI Y, ZHU H. Proposal of a stage-by-stage design method and its application on a multi-stage multiphase pump based on numerical simulations [J]. Advances in mechanical engineering, 2021, 13(1): 16878140209-87317.
- [23] 于群, 章宇, 王阳, 等. 大流量工况下离心泵非定常空化流动特性分析 [J]. 机电工程, 2022, 39(7): 935-941.
YU Qun, ZHANG Yu, WANG Yang, et al. Analysis on unsteady cavitation flow characteristics of centrifugal pump at large flow rate [J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2022, 39(7): 935-941. (in Chinese)
- [24] LI Y, YU Z, SUN W. Drag coefficient modification for turbulent gas-liquid two-phase flow in a rotodynamic pump [J]. Chemical engineering journal, 2021, 417: 128570.
- [25] WANG B, ZHANG H, DENG F, et al. Effect of short-blade circumferential position arrangement on gas-liquid two-phase flow performance of centrifugal pump [J]. Processes, 2020, 8(10): 1317.
- [26] 周岭, 王万宏, 李跃民, 等. 端面间隙对深井泵性能和内部流场的影响 [J]. 水泵技术, 2020(3): 1-5.
ZHOU Ling, WANG Wanhong, LI Yuemian, et al. Effect of end gap on the performance and internal flow field of deep well pumps [J]. Water pump technology, 2020(3): 1-5. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)