doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.014

叶片开孔位置对电潜泵气液混输性能的影响

张　伟[1],刘义刚[1],甄东芳[2],张　华[1],肖增鹏[2],王　通[2],蒋召平[1],王　健[3],周　岭[3]
(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300457;2.中海油田服务股份有限公司,天津 300457;
3.江苏大学 国家水泵及系统工程技术研究中心,江苏镇江 212013)

摘　要:为了探究电潜泵内部流动机理,改善气液两相条件下电潜泵的能量特性,基于欧拉－欧拉非均相流模型,采用定常数值模拟方法研究了不同叶片开孔位置对电潜泵的水力性能和内部流场的影响。通过纯水工况下的水力性能试验,验证了数值模拟方法的准确性。对比分析了叶片开孔位置在不同流量工况下对压力分布、气相分布等内部流场以及电潜泵外特性的影响。结果表明,改变开孔位置不会提高电潜泵在纯水工况下的性能;但在含气条件下,在叶片中间和前端位置开孔能够提升电潜泵在大流量工况下的水力性能,中间开孔方案的提升效果最为明显;在 5% 的入口含气率下,相比未开孔方案,中间开孔方案的扬程提高了 0.89 m、效率提高了 3.7%。研究结果可为电潜泵的优化设计提供参考。

关键词:电潜泵;气液两相;叶片开孔位置;数值模拟
中图分类号:TH3　　**文献标志码:**A

Influence of blade opening position on gas–liquid multiphase performance of electrical submersible pumps

ZHANG Wei[1], LIU Yigang[1], ZHEN Dongfang[2], ZHANG Hua[1], XIAO Zengpeng[2], WANG Tong[2], JIANG Zhaoping[1], WANG Jian[3], ZHOU Ling[3]
(1.China National Offshore Oil Corporation Tianjin Branch, Tianjin 300457, China; 2.China Oilfield Services Limited, Tianjin 300457, China; 3.National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To investigate the internal flow mechanism of the electric submersible pump and improve the energy characteristics of the electric submersible pump under gas–liquid two–phase conditions, this paper investigates the effects of different blade opening positions on the hydraulic performance and internal flow field of the electric submersible pump based on the Eulerian–Eulerian non–homogeneous phase flow model with steady numerical simulation. The accuracy of the numerical method is validated by the hydraulic performance test under pure water condition. The effects of different blade opening positions on the internal flow field such as pressure distribution, gas phase distribution and the external characteristics of the electric submersible pump are comparatively analyzed under different flow rate conditions. It is found that changing the opening position will not improve the performance of the electric submersible pump under pure water conditions. However, under the gassy condition, blade opening in the middle and front positions can improve the hydraulic performance of under high flow rate conditions, and the middle opening scheme has the most obvious improvement effect. Under the condition of 5% inlet gas content, the head and efficiency of the middle opening scheme are increased by 0.89m and 3.7% compared with the non–opening scheme. The research results can provide reference for the optimization design of electric submersible pumps.

Key words:electrical submersible pumps; gas–liquid two–phase; blade opening position; numerical simulation

0　引言

随着全球经济的快速发展和能源需求的不断增长,油气产业在全球能源结构中的地位愈加重要[1-2],然而,传统的油气开采方法已经不能满足日益增长的巨大需求,近年来油气开采技术正朝

收稿日期: 2024－03－21　**修回日期:** 2025－01－24
基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022–0602);江苏省杰出青年科学基金(BK20230011)

着更高效的方向发展。电潜泵是油气开采行业中应用最为广泛的人工举升设备，由于原油中会伴生有不同的游离气体，因此电潜泵内部经常会出现气液两相流动的情况[3-4]。采用传统方法设计的电潜泵大多仅适用于纯液工况，在高含气工况下极易导致泵的工作效率降低、稳定性下降，影响泵的正常工作和油田的生产效益[5-6]。

为了提高气液两相工况下泵的水力性能，众多学者采用数值模拟和试验测量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。ZAKEM[7]提出了一种一维不可压缩双流体模型，但是该方法无法准确模拟压差较大条件下的气体流动，且忽略了其他维度对流动的影响，因此应用范围较为有限。卢金铃等[8]使用欧拉模型对气液两相工况下的泵进行了数值模拟，发现前盖板侧的压力要低于后盖板侧的压力。MURAKAMI 等[9-10]率先对泵内气液两相流动进行了可视化试验研究，发现在入流含气率较高时气液两相流型会发生变化，在叶轮叶片压力面会形成大尺度的气泡，导致流量不稳定、扬程下降。BARRIOS 等[11]采用可视化模型和高速摄影对电潜泵内部的气液两相流动进行了试验研究，发现在高含气工况下气体聚集在叶片压力面侧，造成电潜泵性能下降，指出可以通过减小气相聚集面积来提高水力性能。王春林等[12]对旋流自吸泵进行了气液两相流数值模拟，发现在叶轮出口处存在大量的气体聚集。ZHANG 等[13]对电潜泵进行了模拟及试验验证，发现气泡尺寸与扬程下降程度存在着较强的关联性。

随着计算流体动力学的快速发展和泵内气液两相理论的逐渐成熟，如何提高泵的气液混输性能成为现阶段研究的重点。LUO 等[14]研究了平衡孔位置对气液两相条件下离心泵性能的影响，发现在入口含气率较低的情况下，平衡孔会降低电潜泵的性能，当平衡孔位于气相聚集区时能够提高电潜泵在高含气工况下的性能。SHI 等[15]利用高速摄影和数值模拟研究了叶顶间隙对气液两相工况下泵性能的影响，研究表明，随着叶顶间隙的增大，泵的增压能力有所下降，此外叶顶间隙改善了泵内气液两相的分布，间隙越大，气液分布越均匀。王鹏等[16]探究了不同叶顶间隙对电潜泵性能的影响，结果表明，随着叶顶间隙的增加，电潜泵的扬程和效率均呈现出下降的趋势。SHI 等[17]通过数值模拟研究了叶片包角对泵内气液两相流动的影响，发现当叶片包角大于 60°时，能量转换效率开始逐渐降低，同时压力面的能量传递能力开始下降。史广泰等[18]采用数值模拟方法研究了叶顶间隙对多相混输泵的影响，发现随着叶顶间隙的增大，叶轮流道进口处低压区变小，叶片顶端附近等压线发生不规则变化，叶轮流道内气相聚集得到改善。

综上所述，气液掺混工况下电潜泵内部流动更为复杂、水力性能有所下降。大量研究表明造成性能恶化的主要原因是气体在叶轮流道内堆积，这为提高电潜泵气液混输性能奠定了理论基础。基于上述研究，本文考虑通过叶片开孔的方法以减少气体在叶轮流道内的聚集，进而提升水力性能。基于欧拉 – 欧拉非均相流模型针对叶片不同位置开孔的单级电潜泵，在不同含气率下和不同流量下进行数值模拟，探究叶片开孔位置对气液两相工况下水力性能和内部流动的影响，以期为后续优化此类电潜泵提供指导。

1 计算模型及网格划分

1.1 计算模型

针对单级电潜泵进行研究，其设计流量 Q_{des}=5.83 m^3/h，单级扬程 H_{des}=5.79 m，额定转速 n=2 917 r/min，比转速 n_s=85.40，计算模型由进口段、叶轮、导叶、腔体和出口段组成。其中，叶轮叶片数为 6，叶轮进口直径为 35.60 mm，叶轮出口直径为 78.80 mm。为了确保进出口流动的充分发展，将进口段和出口段长度分别延长至叶轮进口外径的 5 倍和 10 倍。

1.2 网格划分及无关性验证

采用 ANSYS-ICEM 19.0 软件对电潜泵计算域进行结构化网格划分，如图 1 所示。

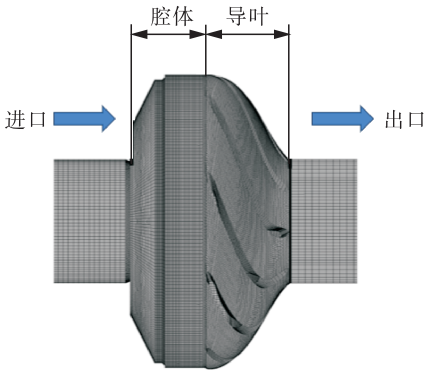


图 1 计算域网格划分

Fig.1 Computational domain meshing

在进行网格划分时，需要选取合适的划分方案，以兼顾计算速度和计算精度。采用了 5 种不同的网格划分方案，在设计流量下进行了数值计算并开展网格无关性分析。随着网格数量的增加，扬程逐渐趋于稳定。最终考虑到计算成本和计算精度的平衡，确定网格总数约 260 万。

1.3 数值模拟方法

1.3.1 纯水工况

选择旋转机械中广泛使用的 SST k–ω湍流模型[19]，采用 ANSYS–CFX 软件进行定常数值仿真。流体介质设置为 25 ℃常温水，入口和出口边界条件分别设置为压力入口和质量流量出口。实体壁边界条件设置为无滑移，近壁面选用标准壁函数，数值收敛精度设置为 10^{-5}。

1.3.2 气液两相工况

采用欧拉 – 欧拉非均相流模型进行气液两相流仿真计算，其中，液相和气相分别作为连续相（Continuous Fluid）和离散相（Dispersed Fluid）介质，两相均设为不可压缩流体。连续相采用 SST k–ω湍流模型，湍流强度设置为 5%。离散相采用离散相零方程模型（Dispersed Phase Zero Equation Model），相间传递方式采用粒子模型。入流气泡直径为 0.2 mm，假设流动中气泡直径保持不变，气相表面张力系数为 0.073[20–29]。各流域之间网格交界面设置与纯水工况保持一致，收敛精度设置为 10^{-4}。

1.4 试验验证

由于受试验条件和时间限制，无法完成气液两相的水力性能试验，为了验证仿真计算结果的准确性，仅对单级电潜泵的实体模型进行纯水工况下的试验。采用已确定的数值模拟方法和网格划分方案，在额定转速 2 917 r/min 下，对单级电潜泵进行了纯水工况的仿真计算。在 $0.6Q_{des}$，$0.8Q_{des}$，$1.0Q_{des}$，$1.2Q_{des}$，$1.4Q_{des}$（其中 Q_{des}=5.83 m^3/h）等 5 个流量工况下进行数值模拟，并将仿真计算结果与水力性能试验性能进行对比，如图 2 所示。由于数值模拟计算中忽略了平衡孔和进口口环间隙，因此数值模拟扬程高于试验扬程；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结果存在一定误差。但总体来说，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，说明数值计算结果基本可靠，选用的网格划分方案合理、数值计算方法精度较高。

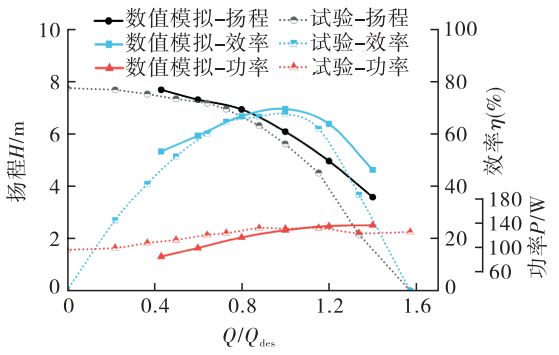


图 2 电潜泵外特性试验与模拟结果对比

Fig.2 Comparison of test and simulation results of external characteristics of ESP

2 叶片开孔位置的影响分析

2.1 叶片开孔位置方案

为探究叶片开孔位置的影响，叶轮叶片上选择了 3 个位置，并在每个位置开设了一个圆形孔。对开孔后的电潜泵分别在 5 个工况点（$0.6Q_{des}$，$0.8Q_{des}$，$1.0Q_{des}$，$1.2Q_{des}$，$1.4Q_{des}$）、4 个入口含气率（0%，1%，3%，5%）下进行定常数值模拟。表 1 列出了孔中心与叶片中心的距离 R 和孔径大小 D 的相关参数。3 种开孔位置方案如图 3 所示。

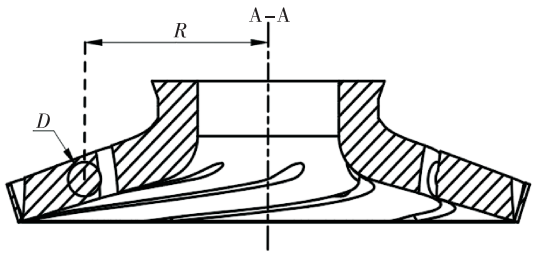


图 3 开孔位置方案示意

Fig.3 Schematic diagram of the perforation location plan

表 1 3 种开孔位置方案

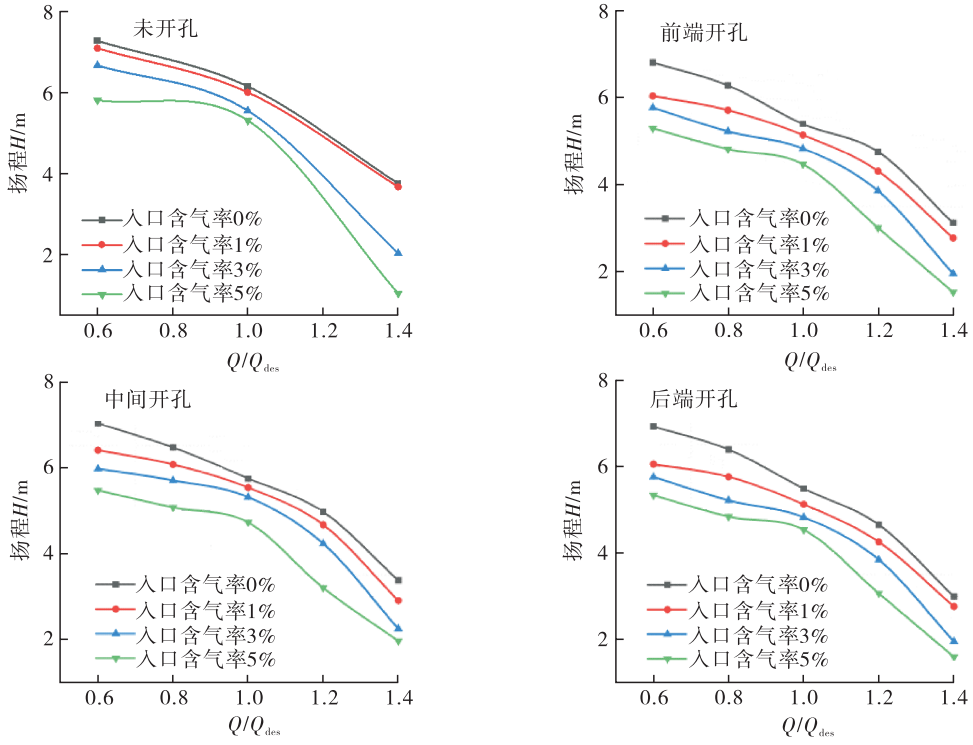
Tab.1 Three perforation location plans mm

位置	前端开孔	中间开孔	后端开孔
开孔直径 D	5	5	5
距叶片中心的距离 R	20	27.5	35

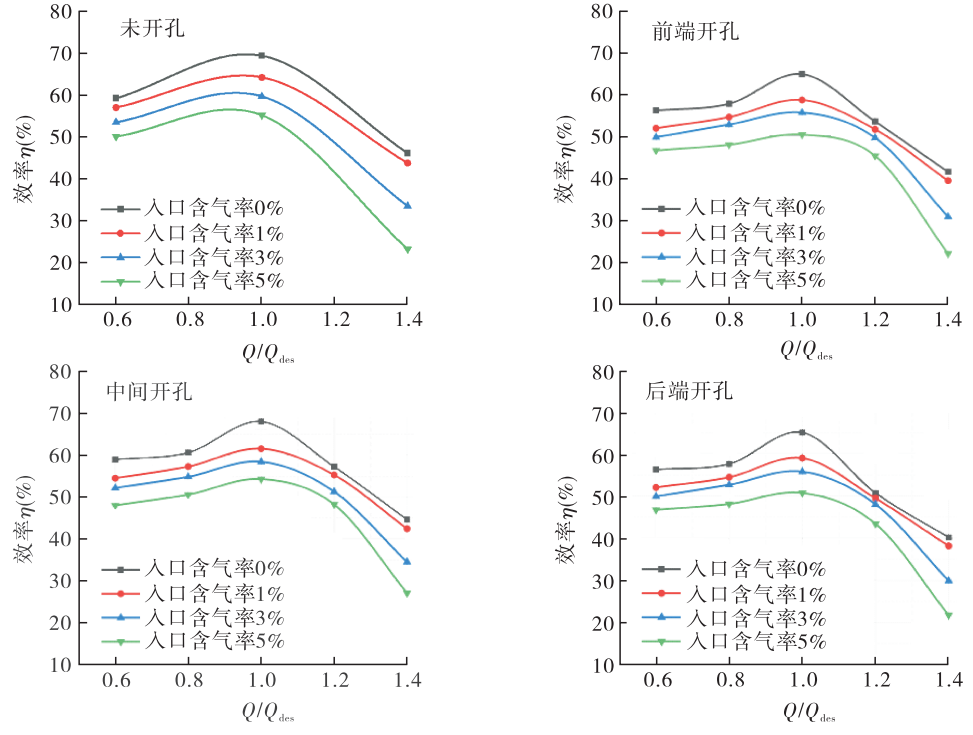
2.2 外特性对比分析

图 4 示出未开孔、前端开孔、中间开孔、后端开孔 3 种方案的外特性结果。从图中可以看出在纯水工况下（入口含气率为 0% 时），未开孔与 3 种位置开孔方案的外特性变化趋势大致相同，扬程随着流量的增加而逐渐降低，功率随着流量的增加逐渐上升，效率随着流量的增大先上升并在

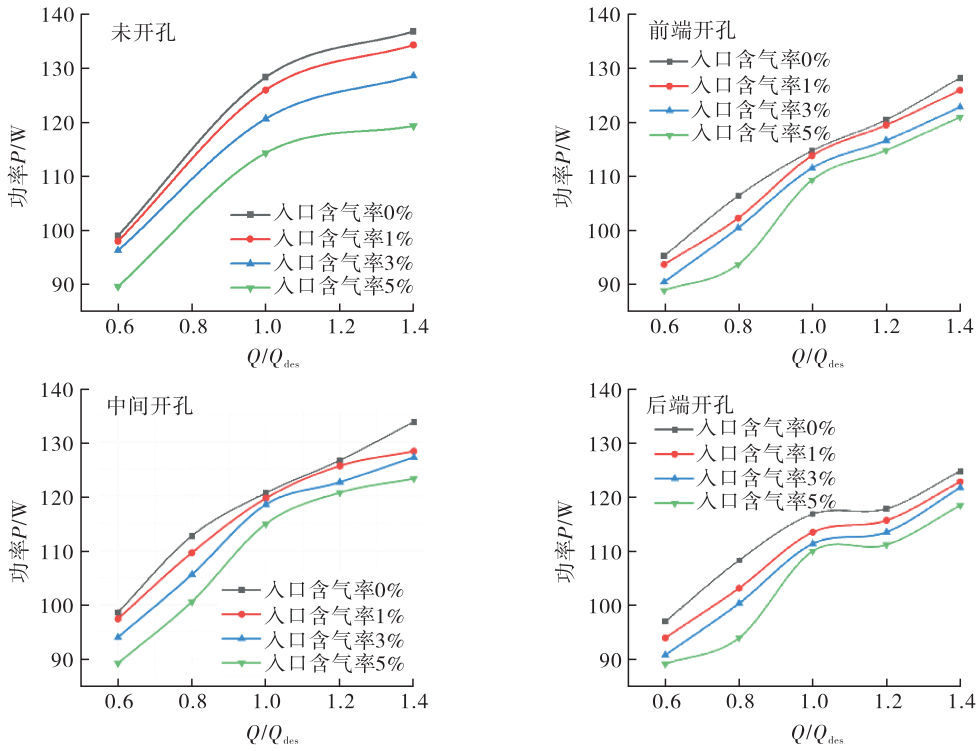
设计流量下达到最大值后下降。由此可以看出，开孔位置并没有对电潜泵在纯水工况下外特性趋势造成显著影响。对比分析纯水工况下未开孔与3种不同开孔位置方案对电潜泵外特性的影响，在全流量工况范围内中间开孔的性能均要优于前端开孔和后端开孔的性能，但劣于未开孔电潜泵的性能。后端开孔小流量条件下的外特性要优于前端开孔，前端开孔在大流量条件下的外特性要优于后端开孔，二者的差值不大、区别不显著。通过以上分析表明，对电潜泵叶片前端、中间、后端开孔相较于未开孔方案，并不会提高纯水工况下的性能。



(a)扬程



(b)效率



（c）功率

图 4　不同开孔位置方案水力性能对比

Fig.4　Hydraulic performance comparison of different perforation location plans

电潜泵在气液两相条件下的性能与入口含气率有较强的联系。在含气工况下，电潜泵的扬程、效率和功率均呈现下降趋势，并且随着气体含量的增加，电潜泵的性能下降越显著。在相同入口含气率情况下，3 种不同位置开孔方案的外特性随流量变化趋势与纯水工况类似。在全流量工况范围内，前端和后端开孔方案的扬程、效率和功率均低于中间开孔方案。在 $0.6Q_{des}$，$0.8Q_{des}$，$1.0Q_{des}$ 流量工况下，后端开孔的外特性参数要略高于前端开孔方案，在 $1.2Q_{des}$，$1.4Q_{des}$ 流量工况下，比前端开孔方案外特性略低。与未开孔电潜泵的性能相比，在 5% 的入口含气率下，流量为 $1.4Q_{des}$ 时，前端和中间位置开孔方案的外特性参数要略高于未开孔方案，且中间开孔要优于前端开孔。具体而言，在 5% 的入口含气率下，未开孔方案的扬程仅为 1.02 m，中间开孔方案的扬程为 1.91 m；未开孔方案的效率为 23.4%，中间开孔方案的效率为 27.1%。通过上述对 3 种开孔位置方案电潜泵外特性的分析，3 种开孔位置均会导致电潜泵纯水工况下的性能下降，在大流量、高含气条件下，叶轮流道中间开孔相比未开孔及其他两种开孔方案的性能更优。

2.3　截面平均含气率的对比分析

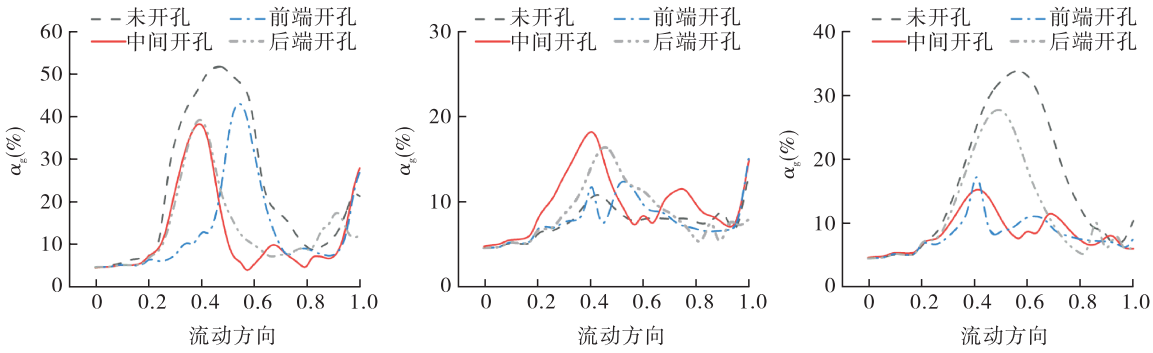
通过将叶轮分为多个截面，对比分析了不同开孔位置方案与未开孔方案的气相分布差异。把叶轮从进口到出口的流道沿流动方向设置了 50 个等距截面。在 5% 入口含气率、3 种流量工况下，对不同截面的面平均含气率进行了对比分析。图 5 示出 3 种开孔位置方案与未开孔方案在 5% 入口含气率条件下，叶轮沿流动方向各个截面的平均含气率分布曲线。从图中可以看出，未开孔方案在中间位置处的平均含气率最高，平均含气率峰值随着流量的增大呈现先减小后增大的趋势。在 3 个流量工况下，3 种开孔方案中心位置处的平均含气率均小于未开孔方案，表明开孔后流经孔的流体会冲散叶轮流道内的气相聚集，从而降低该处的气相含量。

在小流量工况下（$0.6Q_{des}$），通过对比未开孔方案和 3 种不同开孔位置方案的平均含气率分布曲线，发现 3 种开孔方案的峰值均小于未开孔方案，其中，峰值大小关系为中间开孔<后端开孔<前端开孔。前端和中间开孔方案各截面的平

均含气率均低于未开孔方案，而后端开孔方案仅在 0.9 位置处略高于未开孔方案，两者差别不显著。这说明开孔设计可以改善电潜泵在小流量工况下的气相分布。此外，从 3 种开孔方案的分布曲线可以看出，中间开孔方案在各个截面的平均含气率均低于前端和后端开孔方案，仅在 0.7 位置处略高于前端开孔方案。在设计流量工况下（$1.0Q_{des}$），可以发现 3 种开孔方案的平均含气率峰值均高于未开孔方案。在大流量（$1.4Q_{des}$）工况下，3 种方案的峰值与未开孔方案的峰值大小关系为中间开孔<前端开孔<后端开孔<未开孔，3 种方案下各个截面的平均含气率均小于未开孔方案。综合以上分析，可以得出开孔设计会加剧设计流量下的气相聚集，但有助于改善电潜泵在偏设计流量工况下的气相分布。在 3 种不同的开孔方案中，中间位置开孔表现最佳。

2.4 内部流场的对比分析

进一步探究在叶片不同位置开孔后电潜泵在 5% 的入口含气率、不同流量工况下（$0.6Q_{des}$，$1.0Q_{des}$，$1.4Q_{des}$）的内部流场变化，探究叶轮流道中间截面的压力分布、气相体积分数分布变化情况。



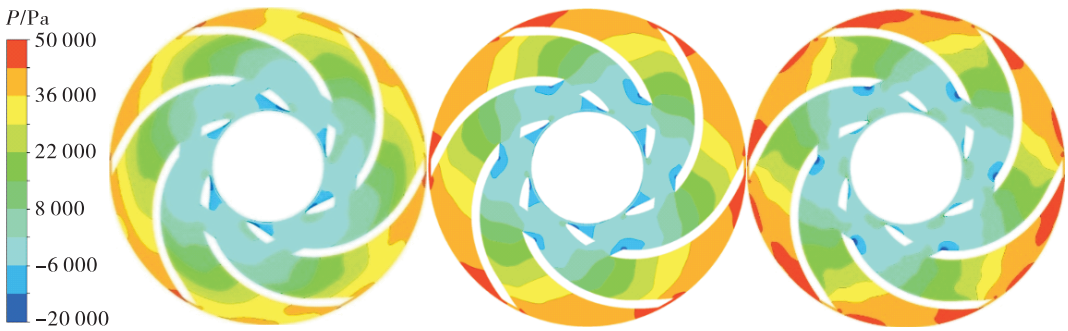
（a）$0.6Q_{des}$ （b）$1.0Q_{des}$ （c）$1.4Q_{des}$

图 5 叶轮沿流动方向各截面平均含气率

Fig.5 Average gas holdup of impeller at each sectional plane along the flow direction

2.4.1 压力分布

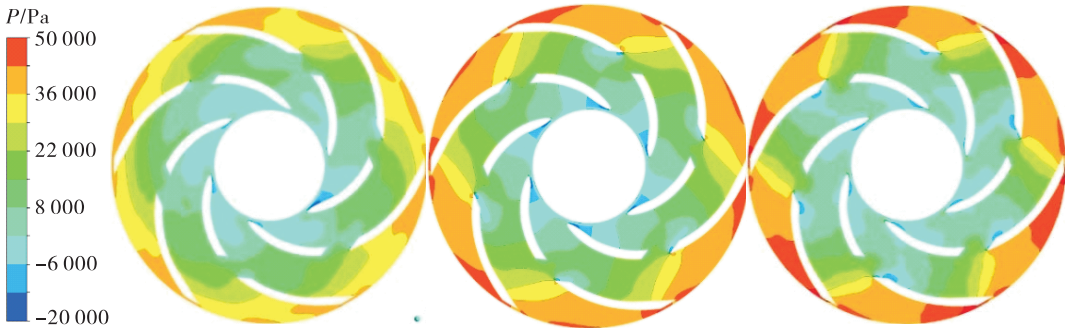
3 种方案的叶轮流道中间截面的压力分布如图 6~8 所示，可以看出，不同位置开孔方案的压力分布较为相似，即叶轮流道内压力沿半径方向逐步增大，同一半径位置工作面的压力要大于背面的压力。压力最低处位于叶轮进口，压力最高处位于叶轮出口。同时，这 3 种方案下叶轮流道内的平均压力都随着流量增大而增大，这是因为流量增大导致流体速度增加，使得液体动能增加，而动能会转化为压力能导致叶轮内的平均压力增大。3 种方案在开孔位置与背面衔接处都出现不同程度的低压区，且随着流量的增大，低压区的面积逐渐增大。



（a）$0.6Q_{des}$ （b）$1.0Q_{des}$ （c）$1.4Q_{des}$

图 6 前端开孔方案叶轮流道中间截面压力分布

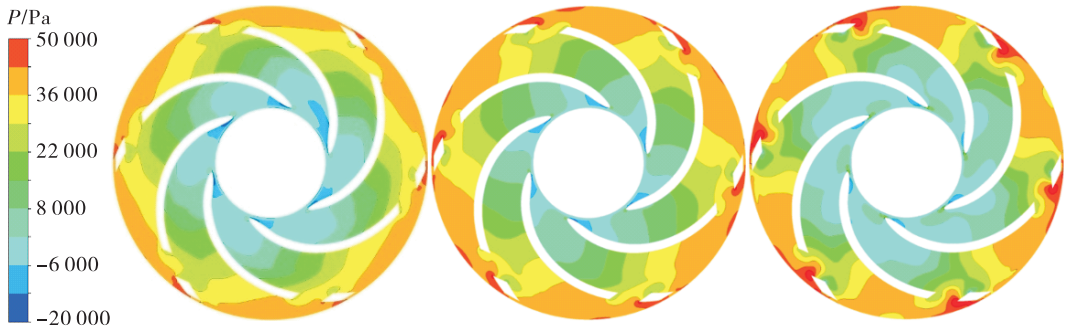
Fig.6 Pressure distribution of impeller flow passage at the middle section of the front-perforated design



（a）0.6Q_{des} （b）1.0Q_{des} （c）1.4Q_{des}

图 7 中间开孔方案叶轮流道中间截面压力分布

Fig.7 Pressure distribution of impeller flow passage at the middle section of the middle-perforated design



（a）0.6Q_{des} （b）1.0Q_{des} （c）1.4Q_{des}

图 8 后端开孔方案叶轮流道中间截面压力分布

Fig.8 Pressure distribution of impeller flow passage at the middle section of the rear-perforated design

3 种开孔方案的叶轮内部压力分布存在较大差异。前端开孔相较于其他两种方案，叶轮流道进口处压力较小；后端开孔相较于其他两种方案，叶轮流道出口处压力较小；中间开孔相较于其他两种方案，叶轮流道内压力分布不均匀性更加显著、平均压力相较其他 2 种方案较大。3 种方案的压力分布呈现不同的原因为开孔使得叶片工作面与背面贯穿，形成了由工作面流向压力面的射流，进而改变了附近区域的流体流动方向和流动状态，从而影响了叶轮流道内部的压力分布。

综上所述，3 种方案的叶轮流道内压力最高和最低位置基本相同，在叶轮流道中间开孔，可以改善叶轮流道内的压力分布，平均压力增大、低压区减少，减少气相聚集和气液分离，从而提高气液混输性能。

2.4.2 气相体积分数分布

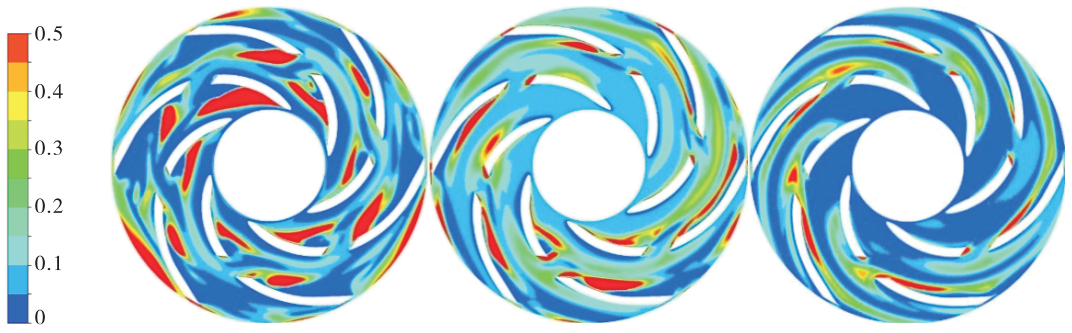
图 9~11 示出不同开孔方案下电潜泵的叶轮流道中间截面气相体积分数分布，从图中可以发现，叶轮流道内不同开孔位置对气体分布产生不同的影响。总体而言，叶轮进口处气相体积分数最小，气相主要聚集于叶片的背面。在小流量工况下，3 种开孔位置方案下气相主要聚集于叶轮流道中间位置，形成了高气相体积分数聚集区域，气液分离现象加剧。中间开孔方案的高气相体积分数区域要小于其他两种方案，气液分离现象有所改善。在设计流量工况下，气相主要聚集于孔叶片与背面衔接处，高气相体积分数区域和低气相体积分数区域较小。在大流量工况下，后端开孔方案的气相主要聚集于叶轮流道中间位置，形成了狭长的高气相体积分数区域，但相比于小流量时有所减小，前端开孔和中间开孔方案的叶轮流道中间位置处气液混合程度增大，大尺度的气泡明显变少，中间开孔方案的气液混合程度要优于前端开孔方案。当流体流经开孔位置时，射流作用会对孔出口周边的流体产生冲击，导致周边的气相体积分数降低，但是也会导致孔与叶片背面衔接的死角处出现气液分离现象。



(a) $0.6Q_{des}$ (b) $1.0Q_{des}$ (c) $1.4Q_{des}$

图 9 前端开孔方案叶轮流道中间截面气相体积分数分布

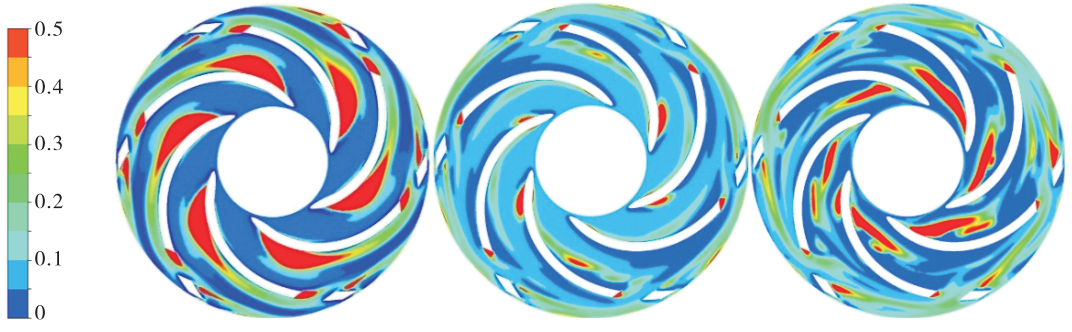
Fig.9 Distribution of gas-phase volume fraction at the middle section of the flow passage of the front-perforated impeller design



(a) $0.6Q_{des}$ (b) $1.0Q_{des}$ (c) $1.4Q_{des}$

图 10 中间开孔方案叶轮流道中间截面气相体积分数分布

Fig.10 Distribution of gas-phase volume fraction at the middle section of the flow passage of the middle-perforated impeller design



(a) $0.6Q_{des}$ (b) $1.0Q_{des}$ (c) $1.4Q_{des}$

图 11 后端开孔方案叶轮流道中间截面气相体积分数分布

Fig.11 Distribution of gas-phase volume fraction at the middle section of the flow passage of the rear-perforated impeller design

综上所述，3 种方案的气相聚集位置相似，在小流量和大流量工况下，高气体体积分数区域均位于叶轮流道中间位置，在设计工况下叶轮流道内均未见明显的大尺度气泡。相较于其他两种方案，中间位置处开孔方案可以显著改善小流量工况和大流量工况下叶轮流道中间位置的气液分离现象，气体分布相较其他两种方案较为均匀，气液混输性能有所提高。

3 结论

（1）在气液两相条件下，中间位置开孔方案的水力性能要优于前端和后端开孔方案，在大流量下尤为明显。具体而言，在 5% 的入口含气率下，未开孔方案的扬程仅为 1.02 m，中间开孔方案的扬程为 1.91 m，提高了 0.89 m；未开孔方案的效率为 23.4%，中间开孔方案的效率为 27.1%，提高

了 3.7%。

（2）在设计流量工况下，对电潜泵进行开孔设计会显著加剧气相聚集；而在偏设计流量工况下，开孔设计则有助于改善电潜泵的气相聚集。在 3 种不同开孔位置的开孔方案中，在流道中间位置开孔表现最佳，能够改善电潜泵在偏设计流量工况下的气相分布。

（3）通过压力分布、气相分布的对比分析，发现在叶轮流道中间开孔能够改善内部流场，相比其他两种方案叶轮内部流动更加稳定，气液混输性能有所提高。

参考文献：

[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] 王延康，刘姝，孙治谦，等 . 叶片式气液分离器结构优化 [J]. 流体机械，2024，52(7)：33 – 41.
WANG Y K, LIU S, SUN Z Q, et al. Structure optimization of vane type gas–liquid separator [J]. Fluid Machinery, 2024, 52(7): 33 – 41.

[3] AJANI A, KELKAR M, SARICA C, et al. Effect of surfactants on liquid loading in vertical wells [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 83: 183 – 201.

[4] 魏清希，刘政，王辉，等 . 泡状入流条件下旋流泵气液两相流动特性 [J]. 流体机械，2023，51(1)：92 – 98.
WEI Q X, LIU Z, WANG H, et al. Investigation on gas–liquid two–phase flow characteristics of a vortex pump under bubble inflow condition [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(1): 92 – 98.

[5] ZHU H W, ZHU J J, LIN Z M, et al. Performance degradation and wearing of electrical submersible pump (ESP) with gas–liquid–solid flow: Experiments and mechanistic modeling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 200: 108399.

[6] ZHU J J, ZHU H W, ZHANG J C, et al. A numerical study on flow patterns inside an electrical submersible pump (ESP) and comparison with visualization experiments [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 173: 339 – 350.

[7] ZAKEM S. Analysis of gas accumulation and slip velocity in a rotating impeller [C] // In proceedings of ASME forum on cavitation and polyphase flow, american society of mechanical engineers, New York, 1980: 32 – 34.

[8] 卢金铃，席光，祁大同 . 离心泵叶轮内气液两相三维流动数值研究 [J]. 工程热物理学报，2003，24(2)：237 – 240.
LU J L, XI G, QI D T. Numerical study on the gas–liquid two–phase 3–D flow in the impeller of a centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 237 – 240.

[9] MURAKAMI M, MINEMURA K. Effects of entrained air on the performance of a centrifugal pump: 1st report, performance and flow conditions [J]. Bulletin of JSME, 1974, 17(110): 1047 – 1055.

[10] MURAKAMI M, MINEMURA K. Effects of entrained air on the performance of centrifugal pumps: 2nd report, effects of number of blades [J]. Bulletin of JSME, 1974, 17(112): 1286 – 1295.

[11] BARRIOS L J. Visualization and modeling of multiphase performance inside an electrical submersible pump [D]. Oklahoma: The University of Tulsa, 2007.

[12] 王春林，吴志旺，司艳雷，等 . 旋流自吸泵气液两相流数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报，2009，27(3)：163 – 167.
WANG C W, WU Z W, SI Y L, et al. Gas–liquid two–phase flow numerical simulation of a vortex flow self–priming pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2009, 27(3): 163 – 167.

[13] ZHANG J Y, CAI S J, LI Y J, 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.

[14] LUO X Q, XIE H, FENG J J, et al. Influence of the balance hole on the performance of a gas–liquid two–phase centrifugal pump [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110316.

[15] SHI G T, LIU Z K, LIU X B, et al. Phase distribution in the tip clearance of a multiphase pump at multiple operating points and its effect on the pressure fluctuation intensity [J]. Processes, 2021, 9(3): 556.

[16] 王鹏，罗兴锜，谢航，等 . 叶顶间隙对气液混输泵水力性能的影响研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑，2022，37(2)：143 – 151.
WANG P, LUO X Q, XIE H, et al. Effect of tip clearance on hydraulic performance of gas–liquid two–phase pump [J]. China Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(2): 143 – 151.

[17] SHI G T, LIU Z K, XIAO Y X, et al. Energy conversion characteristics of multiphase pump impeller analyzed based on blade load spectra [J]. Renewable Energy, 2020, 157: 9 – 23.

[18] 史广泰,刘宗库,王彬鑫.叶顶间隙对多相混输泵内流动特性的影响[J].排灌机械工程学报,2022,40(4):332 – 337.
SHI G T,LIU Z K,WANG B X.Effect of tip clearance on flow behaviors in a multiphase pump[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(4):332 – 337.

[19] SPEZIALE C,ABID R,ANDERSON E.Critical evaluation of two-equation models for near-wall turbulence[J].AIAA Journal,1992,30(2):324 – 331.

[20] 李少年,张子骞,陈世豪,等.黏温黏压下径向柱塞泵滑靴副温度分布与泄漏量分析[J].机电工程,2024,41(10):1903 – 1913.
LI S N,ZHANG Z Q,CHEN S H,et al.Analysis of temperature distribution and leakage of slipper pair of radial piston pump under viscous temperature and pressure characteristics[J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2024,41(10):1903 – 1913.

[21] 刘明尧,刘贝垚.轴向柱塞泵热特性及热力学建模实验研究[J].机电工程,2024,41(7):1207 – 1214.
LIU M Y,LIU B Y.Experimental study on thermal characteristics and thermodynamic modeling of axial piston pump[J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2024,41(7):1207 – 1214.

[22] 李双喜,宋子锋,杨兴,等.气液两相射流搅拌流场分析及工艺参数影响规律研究[J].流体机械,2023,51(7):17 – 23.
LI S X,SONG Z F,YANG X,et al.Analysis of gas-liquid two-phase jet mixing flow field and numerical simulation of influence of process parameters[J].Fluid Machinery,2023,51(7):17 – 23.

[23] 吴志伟,王通,王彦龙,等.高效管换热器壳程传热强化效果及机理[J].压力容器,2023,40(8):44 – 52.
WU Z W,WANG T,WANG Y L,et al.Shell-side heat transfer enhancement effects and mechanisms of heat exchangers with high-efficiency tubes[J].Pressure Vessel Technology,2023,40(8):44 – 52.

[24] 苏明,李佳忆,史春艳,等.空化对多级液力透平叶片压力脉动影响的数值模拟[J].液压气动与密封,2024,44(11):44 – 51.
SU M,LIJ Y,SHIC Y,et al.The influence of cavitation on pressure pulsation of multistage centrifugal pump as turbine based on numerical simulation[J].Hydraulics Pneumatics & Seals,2024,44(11):44 – 51.

[25] 李琪飞,李占勇,谢耕达,等.转轮及导叶流域固液两相流研究[J].液压气动与密封,2024,44(4):37 – 47.
LI Q F,LI Z Y,XIE G D,et al.Study of solid-liquid two-phase flow in rotor and guide vane basin[J].Hydraulics Pneumatics & Seals,2024,44(4):37 – 47.

[26] 李林敏,宁望辉,杨顺银,等.基于空泡溃灭势能的泵内空化空蚀特性[J].排灌机械工程学报,2024,42(12):1203 – 1210.
LI L M,NING W H,YANGS Y,et al.Cavitationandcavitationerosioncharacteristicsinpumpbasedoncavitationbubblecollapseenergy[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(12):1203 – 1210.

[27] 张洪涛,田晨彪,龙云.入口来流对离心泵内部流动的影响[J].排灌机械工程学报,2024,42(9):881 – 887.
ZHANG Hongtao,TIAN Chenbiao,LONG Yun.Influence of inflows on internal flows stability of a centrifugal pump[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(9):881 – 887.

[28] 董楸煌,叶一均,叶大鹏.响铃卷生产装备设计与试验[J].包装与食品机械,2024,42(1):83 – 87.
DONG Q H,YE Y J,YE D P.Design and experiment of ring roll production equipment[J].Packaging and Food Machinery,2024,42(1):83 – 87.

[29] 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.

作者简介:张伟(1983),男,高级工程师,主要从事石油开采技术的研究,E – mail:zhangwei67@cnooc.com.cn。

通信作者:周岭(1986),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械内流机理的研究,通信地址:212013 江苏省镇江市学府路江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心,E – mail:lingzhou@ujs.edu.cn。

本文引用格式:
张伟,刘义刚,甄东芳,等.叶片开孔位置对电潜泵气液混输性能的影响[J].流体机械,2025,53(2):109 – 118.
ZHANG W,LIU Y G,ZHEN D F,et al.Influence of blade opening position on gas-liquid multiphase performance of electrical submersible pumps[J].Fluid Machinery,2025,53(2):109 – 118.