

来流含气条件对带分流叶片的余排泵性能影响

高俊浩, 杨焱, 刘雷, 周宸宇, 刘立军
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对核电站余热排出系统(RRA)核心设备余排泵的工作环境处于恶劣的气液两相状态, 研究含气对其扬程及效率的影响及影响机理。基于 SST $k-\omega$ 湍流模型和欧拉-欧拉非均相模型, 对带有分流叶片的余排泵在不同气相体积分数及气泡尺寸下进行数值模拟, 分析叶轮中后段速度变化及泵内气相分布情况, 探寻气相存在对余排泵性能影响及其机理。结果表明: 来流含气会增大水力损失, 气相体积分数为 5% 和 10% 时, 扬程分别下降约 9.2% 和 20.0%, 效率分别下降约 6.4% 和 12.5%。余排泵内气相主要分布在叶片压力面侧、分流叶片进口及叶轮导叶间隙处; 气相的存在使分流叶片进口段的相对速度在叶片吸力面增幅大于压力面, 形成脱流和漩涡, 为气相聚集创造条件; 叶轮出口绝对速度也发生变化, 与不含气的情况相比, 气相体积分数为 5% 和 10% 时, 出口绝对速度平均值分别下降了 4.5% 和 8.9%, 且绝对速度在叶片吸力面侧增加, 压力面侧下降, 加剧了出口流动的不均匀性及导叶内的水力损失。该研究结果可为气液两相工作条件下带分流叶片的余排泵设计提供技术参考, 并可推广至其他带分流叶片的离心泵。

关键词: 余排泵; 气液两相; 分流叶片; 扬程; 效率

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507013 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0129-11

Study on the Impact of Gas Content in Inflow Conditions on the Performance of Residual Heat Removal Pumps with Splitter Blades

GAO Junhao, YANG Yao, LIU Lei, ZHOU Chenyu, LIU Lijun
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Given that the residual heat removal pump (RHRP), a core component of a nuclear power plant's residual heat removal system (RRA), operates under harsh gas-liquid two-phase conditions, the influence of gas content on its head and efficiency, as well as the underlying mechanisms are investigated. Based on the SST $k-\omega$ turbulence model and the Euler-Euler multiphase model, numerical simulations are conducted on an RHRP with splitter blades under varying gas volume fractions and bubble sizes. This study analyzes the velocity variations in the middle and rear sections of the impeller and the gas phase distribution inside the pump, exploring the impact of gas presence on RHRP performance and its mechanisms. The results indicate that gas content in the inflow conditions increases hydraulic losses: at gas volume fractions of 5% and 10%, the head decreases by approximately 9.2% and 20.0%, respectively, while efficiency drops by about 6.4% and 12.5%. Gas primarily accumulates on the pressure side of the blades, at the

inlet of the splitter blades, and in the gaps between the impeller and guide vanes. The presence of gas causes a greater increase in relative velocity on the suction side than on the pressure side at the inlet of the splitter blades, leading to flow separation and vortex formation, which promote gas accumulation. Additionally, the absolute velocity at the impeller outlet changes—compared to gas-free conditions, the average absolute velocity decreases by 4.5% and 8.9% at 5% and 10% gas content, respectively. Moreover, the absolute velocity increases on the suction side and decreases on the pressure side, exacerbating flow non-uniformity at the outlet and hydraulic losses in the guide vanes. These findings provide technical guidance for the design of RHRPs with splitter blades under gas-liquid two-phase conditions and can be extended to other centrifugal pumps with splitter blades.

Keywords: residual heat removal pump; gas liquid two-phase system; splitter blades; head and efficiency

核能作为绿色能源,因其生态影响小、能量密度高且供电响应迅速等特点^[1-2],已成为能源结构调整的重要选项,但是核电的安全运行仍是主要关注点,尤其在福岛核事故后,各国努力提高核电的安全性^[3-4]。余排泵作为唯一安装于安全壳内的核电站二级泵,是核电站余热排出系统的关键设备,其稳定运行对核电站的安全运行至关重要^[5]。

由于核电系统内冷却剂会存在一定的损失,导致核电系统循环回路工作时处于复杂的气液两相流状态^[6],对余排泵的稳定运行产生显著的影响。目前针对余排泵在气液两相工作条件下的研究较少。一般情况下余排泵为离心泵,在离心泵气液两相研究中,袁寿其等^[7]进行数值模拟,在大流量工况下,离心泵外特性与试验数据更为吻合。现有的研究结果表明:当来流含气时,将导致离心泵的扬程和效率下降,并恶化叶轮内部流动^[8-12]。气相的存在会降低泵内部的压力,当气相体积分数达到一定数值时,叶轮内将出现流动分离现象,流动的不稳定性加剧^[13-15]。气相多聚集在叶轮进口区域,并随着气相体积分数的增大逐渐向流道出口扩散,且气相的存在会导致泵内部出现漩涡,随着气相体积分数的增大,泵内流线紊乱,漩涡分布面积随之增大^[16-19]。在气液两相工作条件下离心泵内部结构优化的相关研究中,学者们详细分析了泵内部结构改变对气液两相分布的影响^[18-21]。此外,靳志鸿等^[20]也得到密封结构对泵内部流动影响较小的结论。上述研究结果均表明,气相的存在会导致离心泵的扬程和效率下降,且有待于从泵内流动损失的角度进行研究。

为了提高泵的扬程及效率,相关学者采用添加或优化分流叶片的措施^[22-26],结果表明分流叶片可以有效改善泵内部的流动,然而对于带分流叶片的

离心泵在气液两相工作条件下的研究较少,仅有 Xu 等^[26]研究了带分流叶片式航空燃油泵叶片在两相流条件下的压力脉动规律。研究结果表明,气相主要附着在叶片压力面侧,添加分流叶片可以改善来流含气引起的泵内部压力脉动恶化现象,但并未分析气相在叶轮内的分布情况及其对泵内流动的影响。

综合上述研究成果,来流含气对带分流叶片泵内部流动特性及气相分布的影响仍有待研究。本文基于 Ansys CFX 软件采用欧拉-欧拉多相流模型,研究了不同气相体积分数及气泡尺寸对带有分流叶片的余排泵外特性参数的影响,探索叶轮内部气相分布情况,并在流程分析的基础上,得到了气相对叶轮内流体速度和漩涡生成的影响规律,分析叶轮内的水力损失,探讨了其如何影响余排泵的外特性,为工作在气液两相条件下的带分流叶片余排泵的设计优化提供了参考,同时此研究结果可以拓展至其他带分流叶片的离心泵。

1 物理模型及理论分析

1.1 物理模型

本文研究对象为某种带有分流叶片的余排泵,此泵的设计性能参数分别为:额定流量 Q_d 为 $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,设计扬程为 25 m,额定转速为 2 800 r/min,比转速为 62.82,此泵属于小比转速离心泵。

整泵主要由进口延长段、叶轮、导叶、蜗壳及出口延长段组成。相关几何参数分别为:叶轮叶片数为 14,且为改善流道内流动,采用长短叶片结构,由 7 枚长叶片及 7 枚短叶片组成,叶轮轮毂直径 $d=28 \text{ mm}$,叶轮进口直径 $D_0=54 \text{ mm}$,出口直径 $D_2=172 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2=5 \text{ mm}$ 。导叶数为 10,导叶进口直径

$D_3=180\text{ mm}$,进口宽度 $b_3=6\text{ mm}$ 。蜗壳的基圆直径 $D_4=216\text{ mm}$,出口管径 $D=54\text{ mm}$ 。

对上述余排泵进行三维建模,如图1所示,给出带有前后密封腔体的整泵模型;并用此模型计算了额定工况的扬程及效率,以确定该余排泵满足相应的设计需求。介质设置为纯水,前后腔体设置为固壁面,此模型在额定转速以及额定流量点的计算扬程为 30.6 m ,满足 25 m 的扬程设计要求。

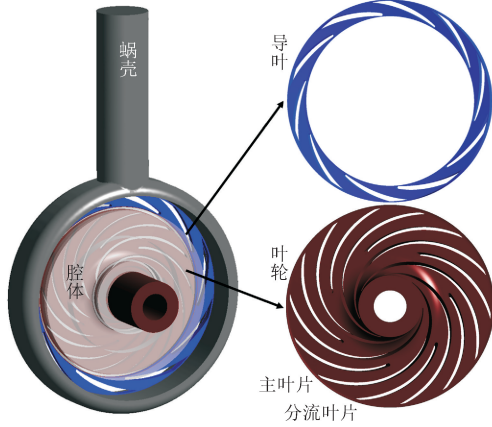


图1 余排泵流体域三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of fluid domain for residual heat removal pump

1.2 理论分析

泵的效率为有效功率与轴功率之比;泵的扬程是泵所抽送的单位质量的液体从泵进口处到泵出口处能量的增值。泵效率 η 和扬程 H 计算式^[27]为

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{\rho g H Q}{M \omega} \quad (1)$$

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + z = \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho g} + z \quad (2)$$

式中: P_e 为有效功率; P 为轴功率; ρ 为均相密度; M 为作用在转子上的扭矩; ω 为角速度; p_s 、 p_d 分别为泵进出口的静压; v_s 、 v_d 分别为泵进、出口的速度; p_{in} 、 p_{out} 分别为泵进、出口的总压; z 为位置水头,其值为泵出口、进口到任意测量基准面的距离差,对本余排泵来说, z 为 0.17 m 。

泵内部的水力损失是影响泵扬程和效率的主要因素,其主要包含摩擦损失、流动扩散、弯曲损失、以及冲击损失。上述损失与流速(流量)的平方成正比^[28],其中冲击损失是泵优化设计需要考虑的重要因素,其与叶轮内部的相对速度以及压水室的绝对速度有关。根据如图2所示的速度三角形, u_1 、 u_2

分别为叶片进口、出口圆周速度; v_1 、 v_2 分别为叶片进口、出口绝对速度; w_1 、 w_2 分别为叶片进口、出口相对速度。已知圆周速度大小方向一定,叶片上相对速度的方向固定,在叶轮内部,当流道内相对速度方向与叶片上方向一致时,将不产生冲击损失,而当流道内流速大小和方向改变时,可能导致相对速度改变,形成较大的冲击损失。同样地,在导叶压水室,由于导叶静止,当叶轮出口水的绝对速度大小和方向发生变化时,一样会形成较大的冲击损失。

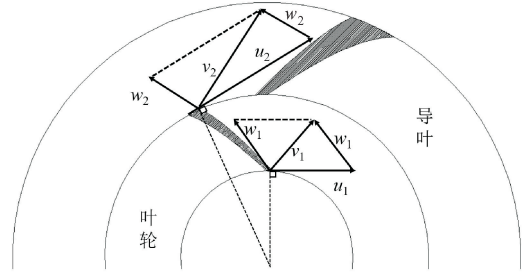


图2 叶轮进出口叶片上速度三角形

Fig. 2 Impeller inlet and outlet velocity triangle on blade

分析来流含气对余排泵扬程和效率影响的关键在于分析叶轮内流体的相对速度与导叶进口位置流体的绝对速度,基于此,分析气相对泵内部水力损失的影响。

2 数值计算方法

2.1 多相流模型与湍流模型

应用 Ansys CFX 软件对余排泵进行数值计算,多相流模型采用欧拉-欧拉非均相模型。充分考虑相间速度滑移与能量传递情况,其连续方程和动量方程^[29]如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{u}_i) = -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \{ \alpha_i \mu_i [\nabla \mathbf{u}_i + (\nabla \mathbf{u}_i)^T] \} + \alpha_i \rho_i \mathbf{f}_i + \mathbf{M}_D + \mathbf{M}_L + \mathbf{M}_{WL} + \mathbf{M}_{TD} + \mathbf{M}_{VM} \quad (4)$$

式中: i 为任一项($i = g$ 表示气相, $i = l$ 表示液相), α_i 为 i 相体积分数; ρ_i 为 i 相密度; $\mathbf{u}_i$ 为叶轮中 i 相流体速度; p_i 为 i 相压力; μ_i 为 i 相动力黏度; $\mathbf{f}_i$ 为叶轮旋转有关质量力; $\mathbf{M}_D$ 代表曳力,由气相与液相间的相对运动引起; $\mathbf{M}_L$ 代表升力,是由垂直于气泡运动方向的压差引起的侧向力; $\mathbf{M}_{WL}$ 代表壁面附近滑移速度引起的壁面润滑力; $\mathbf{M}_{TD}$ 代表湍流扩散力,代表液体湍动对气泡的牵引力; $\mathbf{M}_{VM}$ 代表虚拟质量力,

是相对加速度变化引起的力。

气泡雷诺数 Re_b 为

$$Re_b = \frac{\rho_l |\mathbf{u}_r| d_b}{\mu_l} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_r$ 表示两相间的相对速度; d_b 表示气泡直径。

$$\begin{cases} \mathbf{M}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_l |\mathbf{u}_r| \mathbf{u}_r A_d \\ \mathbf{M}_L = -C_L \rho_l \alpha_g \mathbf{u}_r \times (\nabla \times \mathbf{u}_l) \\ \mathbf{M}_{WL} = C_{WL} \frac{\rho_l \alpha_g}{d_b} \mathbf{u}_{rw}^2 \mathbf{n}_w \\ \mathbf{M}_{TD} = -C_{TD} \rho_l k_1 \nabla \alpha_i \\ \mathbf{M}_{VM} = \alpha \rho_l C_{VM} \left(\frac{d\mathbf{u}_g}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_l}{dt} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_D 、 C_L 分别为曳力系数、升力系数,与气泡雷诺数 Re_b 有关。 A_d 为两相间的相对速度和气相投影面积; k_1 为液相的湍动能; $\mathbf{u}_{rw}$ 为相对速度在壁面处的切向分量; $\mathbf{n}_w$ 为壁面上的单位外法向量; C_{WL} 、 C_{TD} 、 C_{VM} 分别为壁面润滑力系数、湍流扩散力系数、虚拟质量力系数^[30]。

气相和液相的体积分数满足

$$\alpha_g = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} = 1 - \alpha_l \quad (7)$$

式中: Q_g 、 Q_l 分别为叶轮中气体和液体的体积流量。

本文气相选用零方程模型,液相湍流模型采用广泛应用于水泵领域的 SST $k-\omega$ 湍流模型,气液两相间的动量传递方式选择为 Schiller-Naumann 模型,不考虑气液两相的重力,采用雷诺时均法(RANS)将 Navier-Stokes 方程对时间求平均,求解时均量以进行余排泵内流动的定常数值计算。

2.2 计算网格及边界条件设置

因为前后密封腔体对于余排泵内部流动的影响较小^[22],所以为简化模型计算,在数值计算时不考虑前后密封腔体的影响,计算域包括进口延长段、叶轮、导叶和环形压水室。为保证计算结果可靠并节约计算成本,叶轮与导叶计算域采用 Numeca 软件生成六面体结构化网格,并将壁面第一层网格高度设置为 0.01 mm,以保证壁面 y^+ 小于 1。蜗壳计算域采用 ICEM 软件生成非结构网格。各部件及整泵计算域网格如图 3 所示。

为了尽量减小网格数对数值计算结果的影响,改变叶轮导叶的网格划分尺寸,通过余排泵的扬程和效率验证网格数的独立性。图 4 给出了余排泵扬程及效率随网格数的变化情况,当网格总数超过 2 505 万时,余排泵的扬程和效率基本保持不变,因此选取 2 505 万网格作为计算网格。

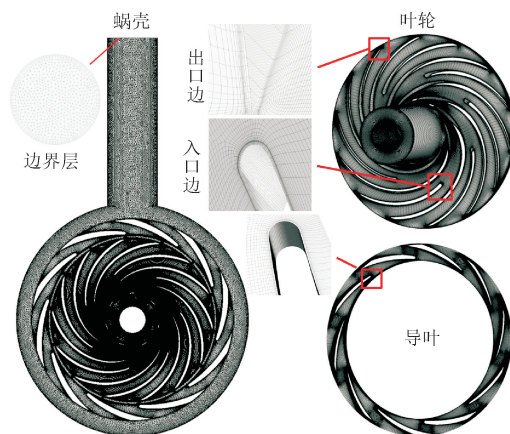


图3 余排泵各部件流体计算域网格

Fig. 3 Grids diagram of residual heat removal pump

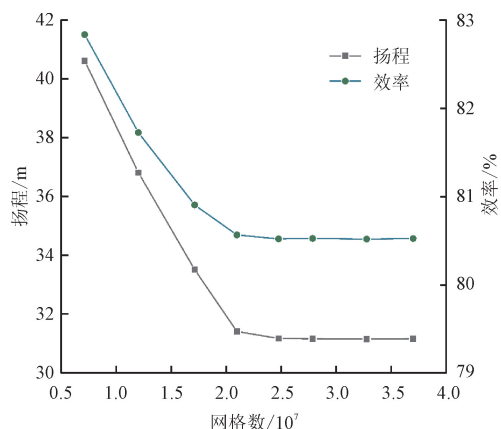


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Verification of grid independence

余排泵输入介质为气液混输,液相为不可压缩连续相,介质为水,常温下密度为 $998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;气相为不可压缩离散相,介质为空气,气泡设置为球形。进口气相和液相均匀分布,来流条件下气相体积分数 α 分别设置为 2%、5%、8%、10%。在研究进口气相体积分数的影响中,控制气泡尺寸(气泡直径 R)为 0.10 mm,取气相体积分数为 0、5%、10%的结果进行分析以获得显著的差异性;在气泡尺寸的影响中,控制气相体积分数为 5%,将气泡直径分别设置为 0.10、0.15、0.20 mm。进口压力设置为 0.2 MPa,出口设置为质量流量出口,考虑到气相的加入会使得质量流量发生变化,根据气相体积分数调整出口质量流量。转子转速为 2 800 r/min,固体壁面边界条件设置为无滑移壁面,稳态计算中采取冻结转子模型交界面从而实现叶轮和定子之间的耦合。

稳态计算的求解参数时间项选物理时间尺度,取值为转速的倒数,即 $t=0.0034 \text{ s}$ 。收敛判据选平

均值,取 1.0×10^{-5} 。为获得更精确的计算结果,采用高阶算法双精度求解。

2.3 模型验证

纯水条件下不含前后腔体简化模型的数值模拟结果与试验结果对比见表1。模拟结果与试验结果变化规律基本保持一致,误差在5%左右,验证了简化模型的准确性。模拟结果的扬程均略高于试验结果,这是由于试验过程中余排泵的运行管路无法绝对封闭,且流体与壁面间存在沿程摩擦损失。

表1 纯水条件下简化模型扬程与试验对比

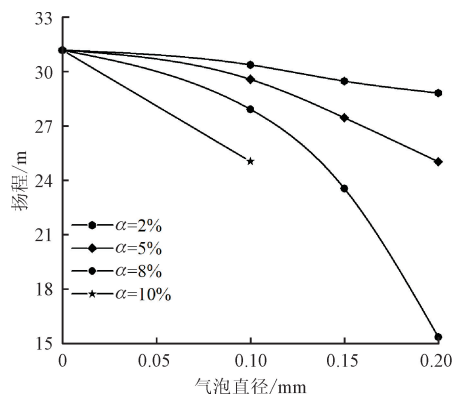
Table 1 Simplified model head and experimental comparison under pure water conditions

体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	模拟扬程/m	试验扬程/m	误差/%
13	34.5	33.5	3.0
15	32.9	31.3	5.1
17	31.4	29.9	5.0
19	30.2	28.8	4.8
21	28.3	26.9	5.1

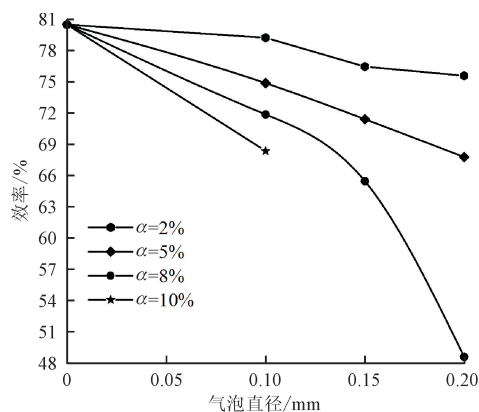
3 结果与讨论

3.1 来流含气对余排泵扬程和效率的影响

图5给出了余排泵扬程和效率在来流含气条件下的变化曲线。结果表明,来流含气会导致余排泵扬程和效率下降,相较于不含气条件,在气泡直径为0.10 mm、气相体积分数为5%和10%下,扬程分别下降约9.2%和20.0%,效率分别下降约6.4%和12.5%,在上述条件下余排泵扬程和效率随气相体积分数增大而下降的规律近似呈现线性关系。当气相体积分数高于8%时,余排泵外特性随气泡尺寸的增大将会出现骤降的现象。研究结果表明,当气相体积分数较大时叶轮流道中将充斥大面积的气相聚集区域,严重恶化流动,发生断流^[31]。如图5所示,本研究在气相体积分数为10%、气泡直径大于0.15 mm时,发生断流。



(a) 气相体积分数对余排泵扬程的影响



(b) 气相体积分数对余排泵效率的影响

图5 气相体积分数及气泡直径对余排泵扬程和效率的影响

Fig. 5 Influence of incoming gas content on the head and efficiency of residual heat removal pump

3.2 来流含气对带分流叶片余排泵外特性影响机理

在气相对于离心泵外特性影响的研究中,学者多从压力场以及流场的角度进行分析。结果表明,气相的存在会导致漩涡的产生,泵内部的总压下降,从而降低泵的扬程和效率。因此,本研究基于前人对压力和流场的研究,针对余排泵内气相分布、泵内流速随气相的变化情况,分析来流含气对余排泵内漩涡产生及水力损失的影响,从而揭示含气引起余排泵外特性下降的原因。

3.2.1 流场及速度分布

由于流场可以直观地反映泵内部水流速度的方向和大小,以及泵内部漩涡分布位置。图6给出气泡直径为0.10 mm、额定工况、不同气相体积分数时,半叶高界面上的流场分布情况。图7给出5%气相体积分数下不同气泡尺寸对泵内流动情况的影响。其中A区域为分流叶片进口位置,B区域为叶轮与导叶间隙位置,C区域为叶轮中后段贴近主叶片区域。

分析图6结果,在分流叶片进口(区域A)、来流条件中含气时,会导致此区域出现速度小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的漩涡,且漩涡的分布面积随气相体积分数的增大而向叶轮周向及出口方向发展,直至包裹整个分流叶片。在叶轮导叶间隙(区域B)处,随着来流气相体积分数的增大,该区域“雨滴状”漩涡面积增大,漩涡附近的流体流速有所下降。同时,对比贴近主叶片(区域C)处流体的流速大小,相较于不含气时的 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气相体积分数达到10%时,此区域的流速达到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合分流叶片附近因为漩涡导致的流速减小现象,这说明气相会导致叶轮出口区域的水流速度发生剧烈变化,增加了流动的不均匀性。

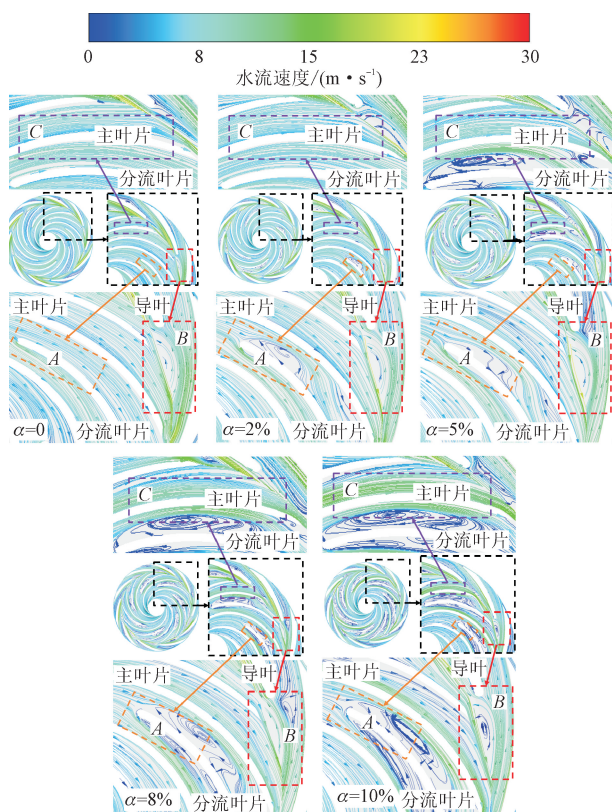


图6 气泡直径为0.10 mm时气相体积分数对泵内流场的影响

Fig. 6 Influence of different gas contents on the flow field inside the pump under rated operating conditions with bubble size of 0.10 mm

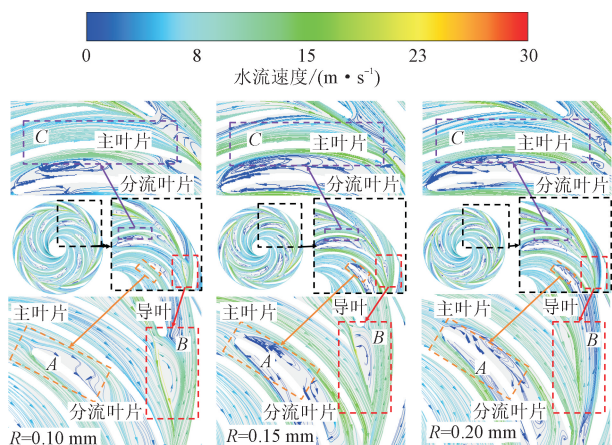


图7 气相体积分数为5%时气泡尺寸对泵内流场的影响

Fig. 7 Influence of different bubble sizes on the flow field inside the pump under rated operating conditions with 5% gas phase volume fraction

对比图7中气相体积分数为5%的条件下,气泡尺寸对余排泵内流动的影响。随气泡尺寸的增大,在分流叶片进口区域以及叶轮中后段漩涡分布面积增大,导叶内流速下降,且贴近主叶片区域流体

流速增大。这说明气泡尺寸变化对余排泵内流场的影响与气相体积分数变化的影响相似。

3.2.2 余排泵叶轮叶片及流道内气相分布

研究余排泵叶轮叶片上及流道内部气相分布情况,对分析气相影响余排泵扬程和效率的原因具有重要意义。图8展示了在额定工况下,气泡直径为0.10 mm时气相体积分数对叶轮叶片上气相分布的影响。

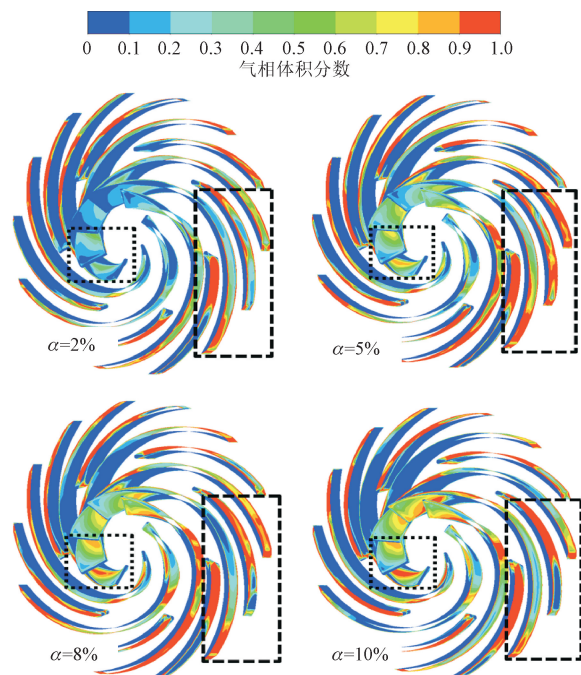


图8 气泡直径为0.10 mm时气相体积分数对叶片上气相分布的影响

Fig. 8 Gas phase distribution on impeller blades at different gas contents when the bubble size is 0.10 mm

结果表明,气相主要聚集在主叶片出口区域压力面侧及分流叶片进口压力面侧。当进口气相体积分数从0增大到5%时,主叶片和分流叶片上气相聚集区域的体积分数为100%区域的面积逐渐增大,这与相关泵内气液两相研究中,气相在叶轮上的分布和变化规律相一致。不同点在于,随着气相体积分数的继续增加,主叶片出口段气相体积分数占比100%的区域面积向叶片出口方向收缩。同时气相体积分数在8%及以上,分流叶片压力面上气相聚集区域面积向进口方向收缩,出口段部分区域出现不含气的现象,进口段气相聚集情况加剧。对比不同气相体积分数下,叶轮进口区域气相分布情况,气相体积分数的增大,会导致叶片吸力面侧聚集的气相体积分数逐渐增大,当进口气相体积分数大于8%时,叶片吸力面上绝大多数区域气相占比50%以上,甚至部分区域出现占比100%的情况。

图 9 给出了来流条件中气相体积分数为 5% 时不同气泡尺寸对叶片上气相分布的影响。结合图 8 进行对比,气泡尺寸对叶轮叶片上气相分布的影响与气相体积分数的影响相似。随着气泡尺寸的增大,分流叶片上气相附着情况加剧,主叶片上气相附着情况有所改善。同时在叶轮进口吸力面侧,气相聚集现象随气泡尺寸的增大而恶化,相较于 $R=0.10\text{ mm}$, 0.20 mm 下该区域气相体积分数为 100% 的面积显著增大。

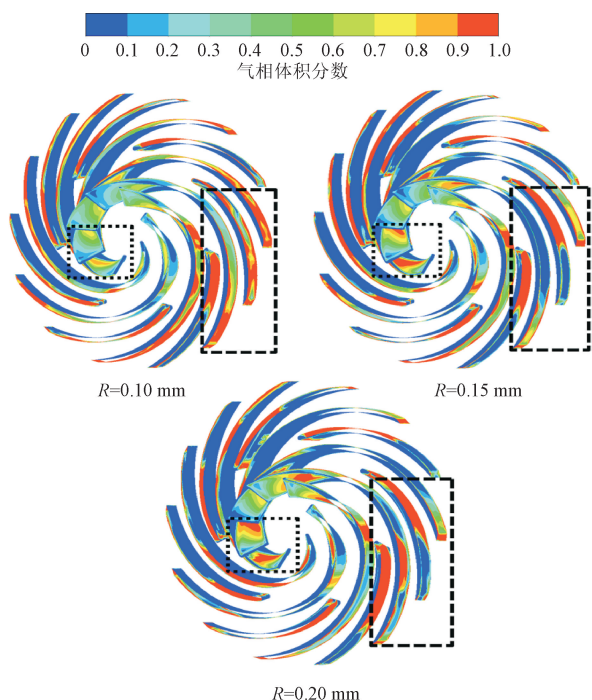


图 9 气相体积分数为 5% 时气泡直径对叶片上气相分布的影响

Fig. 9 Gas phase distribution on blades with different bubble sizes at an imported gas content of 5%

为了探究流道内部的气相分布及聚集情况,如图 10 所示,给出了 $R=0.10\text{ mm}$ 时,气相体积分数对余排泵内 50% 叶高界面处的气相分布的影响。图 11 给出了在 5% 气相体积分数下气泡直径对 50% 叶高界面处气相分布的影响。结果表明:气相的存在会使得在叶轮与导叶间隙位置出现气相聚集的“雨滴状”区域,并随着气相体积分数或气泡尺寸的增大,区域面积逐渐增大。在分流叶片进口区域同样出现气相聚集的现象,且聚集区域面积随着气相体积分数或气泡尺寸的增大,沿流道周向和出口方向发展,直至包裹整个分流叶片。

结合图 6 和图 7 的流场分析可见,气相聚集区域即漩涡产生区域,气相聚集随气相体积分数及气泡尺寸的变化规律与漩涡变化规律相一致,说明余排泵内漩涡的产生与气相的聚集密切相关。同时,

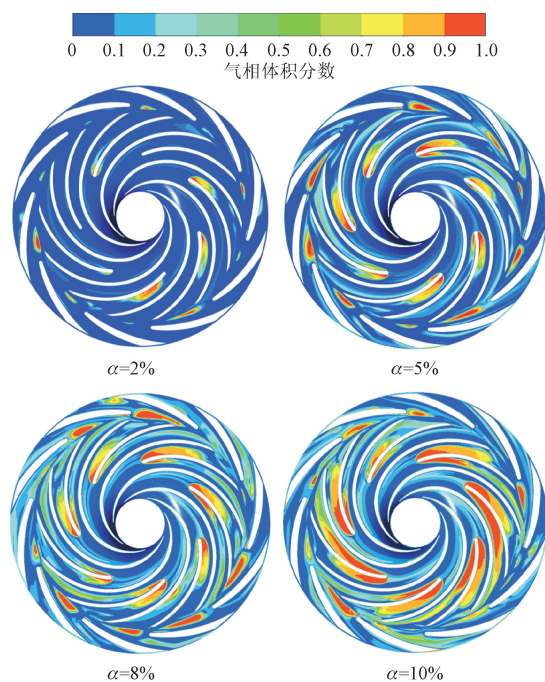


图 10 $R=0.10\text{ mm}$ 时气相体积分数对泵内部气相分布的影响

Fig. 10 Gas phase distribution inside the pump at different gas contents when the bubble size is 0.10 mm

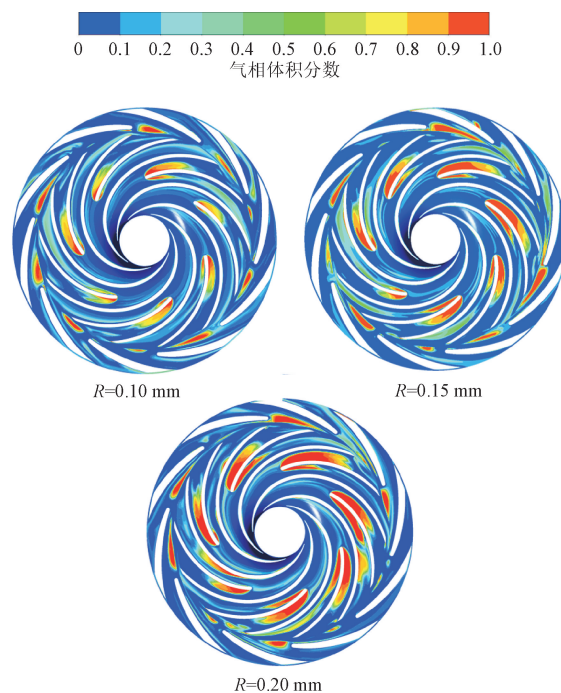


图 11 气相体积分数为 5% 时气泡直径对泵内部气相分布的影响

Fig. 11 Gas phase distribution of different bubble sizes inside the pump at 5% gas content

流过叶轮中后段的水,受到分流叶片进口段气相聚集区域的堵塞和挤压作用,导致分流叶片附近区域

流体流速下降,而贴近主叶片区域的流速则升高。当气相体积分数或气泡尺寸增大时,贴近叶片侧水流速增大,更容易带走叶片上附着的气体,因此在上述条件下,主叶片上气相聚集区域面积反而下降。

3.2.3 气相对余排泵内流体流速及水力损失影响

气相在分流叶片进口及叶轮导叶间隙处聚集,导致这些区域出现大面积低速漩涡。本节从分流叶片进口以及叶轮出口段速度变化的角度,研究气相在上述区域聚集的原因,并分析其对余排泵内水力损失的影响,从而得到来流含气影响余排泵扬程和效率的原因。

由理论分析部分可知,研究的关键在于获得分流叶片进口流体相对速度以及导叶压水室中流体绝对速度的变化规律。根据泵的设计理论^[28],导叶进口流体的绝对速度理想情况可以近似看作叶轮出口流体的绝对速度,因此如图 12 所示,M1~M7 表示主叶片,N1~N7 表示分流叶片,在余排泵分流叶片进口段及叶轮出口附近 10% 叶高、50% 叶高、90% 叶高位置沿周向每 0.1° 均匀布置监测点,且每个叶高的监测点设置为 3 600 个。

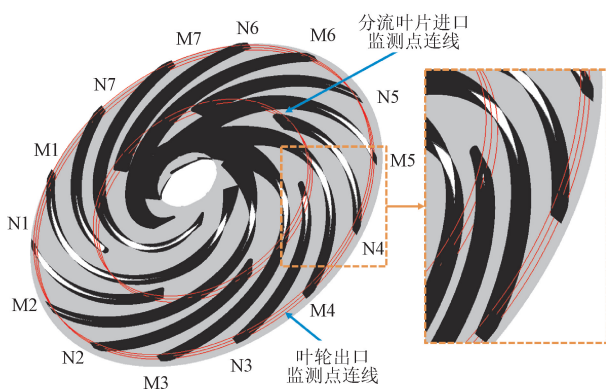


图 12 叶片中后段监测点选取示意图

Fig. 12 Schematic diagram for selecting monitoring points in the middle and rear sections of leaves

结合前文分析,气相体积分数和气泡尺寸的增大,对分流叶片进口和叶轮出口区域流场和气相分布的影响规律相一致,因此气泡尺寸的变化可以近似看作为气相体积分数的变化,后文仅从气相体积分数影响的角度进行分析。图 13 为分流叶片进口不同叶高处流体相对速度随气相体积分数的变化关系,叶轮旋转方向为顺时针方向。结果表明,来流含气会导致余排泵分流叶片进气段,大多数流道内水的相对速度随着气相体积分数的增大而增大,使得余排泵内部的摩擦损失和冲击损失增大,降低泵的扬

程和效率。且对比不同叶高处的相对速度变化,在 50% 叶高处水的相对速度变化最为剧烈,相较于 10% 和 90% 叶高提高近 2 倍。

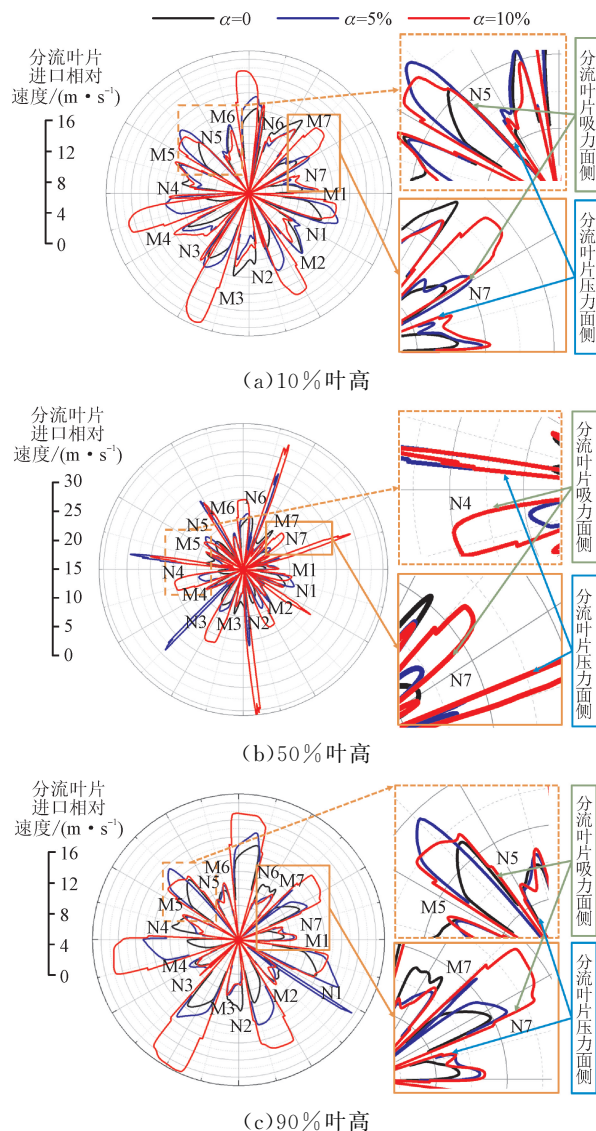


图 13 气相体积分数对分流叶片进口流体相对速度的影响
Fig. 13 Influence of gas content on the relative velocity of fluid at the inlet of splitter blades

结合图 7 流线以及速度三角形分析,分流叶片附近区域的相对液流角将变化,其不仅加剧了分流叶片进口处的冲击,还会造成在分流叶片附近出现脱流的现象,为气相在此区域的聚集创造了条件。同时对比不同叶高位置,分流叶片附近相对速度的变化程度,在 10% 和 90% 叶高处,相对速度在分流叶片吸力面增大幅度远大于压力面,在 50% 叶高处则相反。在侧壁的旋转速度影响下,10% 和 90% 叶高处流体将向叶片背面流动,而 50% 叶高处流体向叶片工作面流动;两股流向不同的水将在此区域形成一对漩涡,进一步恶化此区域的流动,加剧气相的聚集。

图 14 给出叶轮出口段流体绝对速度在不同叶高处随气相体积分数的变化规律。其中,叶片位置与图 12 对应,叶轮旋转方向为顺时针方向,虚线表示不同进口气相体积分数下,叶轮出口位置水绝对速度大小的平均值。表 2 给出不同气相体积分数下

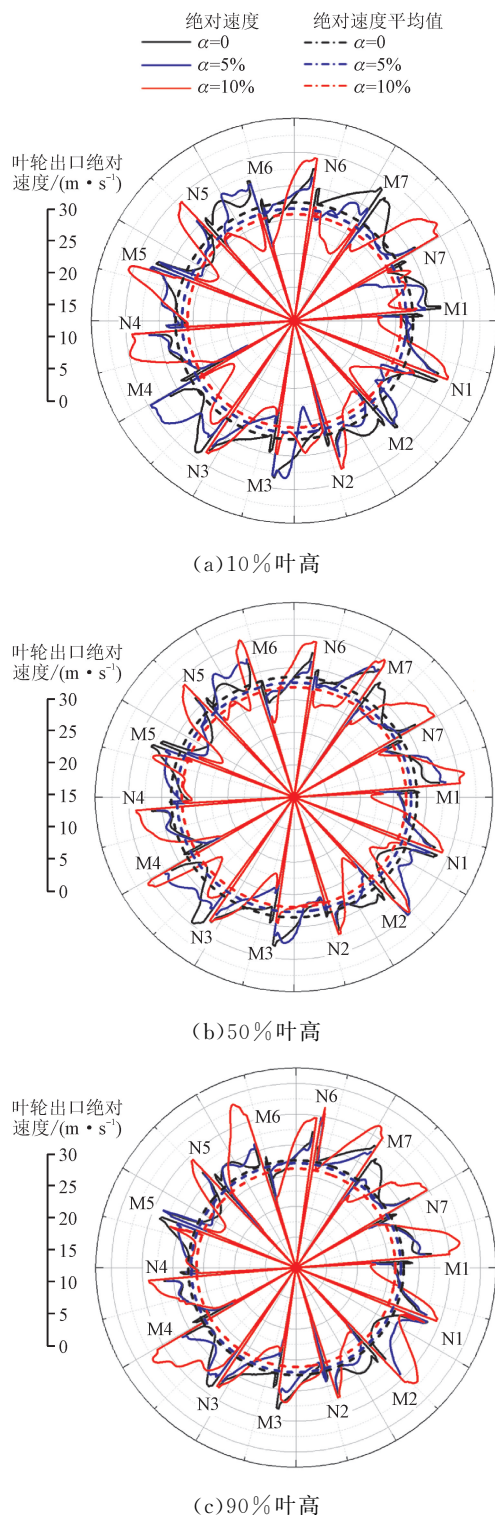


图 14 气相体积分数对叶轮出口流体绝对速度的影响

Fig. 14 Influence of gas-phase volume fraction on the absolute velocity of fluid at the impeller outlet

各叶高处叶轮出口平均绝对速度。结果表明:来流含气会导致叶轮出口位置的平均绝对速度下降,相比于不含气的结果,5%和10%气相体积分数下,出口绝对速度分别下降4.5%和8.9%。因此来流含气将导致余排泵叶轮出口水的动能下降,从而降低其扬程及效率。根据图 7 流线分布以及速度三角形分析,当出口绝对速度大小和方向变化时,导叶内的冲击损失增大。同时气相的存在,还会导致在叶片吸力面侧的绝对速度增大,而压力面侧则下降,不仅加剧了叶轮出口流动的不均匀性,且两股速度大小和方向不同的流体相汇时,必然冲击形成漩涡,进一步增大了水力损失,降低余排泵的性能。

表 2 不同气相体积分数下各叶高处叶轮出口平均绝对速度

Table 2 Average absolute velocity at each blade height at the impeller outlet under different gas-phase volume fractions

叶高	叶轮出口绝对速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	$\alpha=0$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$
10%	17.6	16.6	15.8
50%	18.6	17.7	17.0
90%	17.5	17.1	16.1
平均值	17.9	17.1	16.3

综上所述,来流含气会导致在分流叶片进口段的相对速度增大,叶轮中后段的水力损失增大,且在分流叶片吸力面增大幅度大于压力面,此区域形成脱流区和漩涡,导致气相在此聚集。同时,来流含气会导致叶轮出口段绝对速度在叶片吸力面侧增大,压力面侧下降,平均绝对速度下降,增大了流动不均匀性及导叶内的损失。

4 结 论

本文基于 SST $k-\omega$ 湍流模型和欧拉-欧拉非均相模型,对带有分流叶片的余排泵在不同气相体积分数及气泡尺寸下进行数值计算,研究来流条件含气对于余排泵性能的影响及其机理,结论如下。

(1)来流条件中含气会导致余排泵的扬程和效率下降;相较于不含气条件,气相体积分数为5%和10%时,扬程分别下降约9.2%和20.0%;效率分别下降约6.4%和12.5%。当气相体积分数或气泡尺寸较大时,离心泵的性能骤降。

(2)叶片上的气相主要聚集在压力面侧,流道中的气相主要聚集在分流叶片进口位置以及叶轮导叶间隙处。随着气相体积分数及气泡尺寸的增大,分

流叶片进口位置气相聚集区域沿周向及出口方向发展,直至包裹整个分流叶片。叶轮中后段的水受到气相聚集区域的排挤作用,贴近主叶片区域流速增大,从而削弱了主叶片上气体的附着能力。

(3)来流含气会导致分流叶片进口段的相对速度增加,并改变流动方向。由于叶片吸力面的增幅大于压力面,进而在该区域出现脱流和漩涡,增加了水力损失,为气相聚集创造了条件。此外,来流含气还导致叶轮出口段绝对速度变化,与不含气条件相比,在气相体积分数为5%和10%时,出口绝对速度平均值分别下降了4.5%和8.9%;且绝对速度在叶片吸力面侧增加,压力面侧下降,进一步加剧了流动的不均匀性和导叶内的损失,降低了余排泵的扬程和效率。

参考文献:

- [1] HJELMELAND M, NØLAND J K, BACKE S, et al. The role of nuclear energy and baseload demand in capacity expansion planning for low-carbon power systems [J]. *Applied Energy*, 2025, 377 (Part A): 124366.
- [2] YASIR MEHBOOB M, MA Benjiang, SADIQ M, et al. How do nuclear energy consumption, environmental taxes, and trade globalization impact ecological footprints? Novel policy insight from nuclear power countries [J]. *Energy*, 2024, 313: 133661.
- [3] BAO Han, ZHANG Hongbin, SHORTHILL T, et al. Quantitative evaluation of common cause failures in high safety-significant safety-related digital instrumentation and control systems in nuclear power plants [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108973.
- [4] KIM M C. Rigorous derivation of interfacing system LOCA frequency formulas for probabilistic safety assessment of nuclear power plants [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109470.
- [5] 孟英. 余热排出泵叶轮屏蔽清洗装置设计 [J]. *工程技术研究*, 2022, 7(15): 92-94.
MENG Ying. Design of shielding cleaning device for the impeller of the waste heat discharge pump [J]. *Engineering and Technological Research*, 2022, 7(15): 92-94.
- [6] LI Huarui, LIU Xiangsong, CHEN Huazheng, et al. Study on the characteristics of gas-liquid two-phase flow with forward-rotation in reactor coolant pump under LOCA [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2025, 213: 111107.
- [7] 袁寿其, 何文婷, 司乔瑞, 等. 基于 MUSIG 模型的气液两相流离心泵内部流动数值模拟 [J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(4): 325-330.
- YUAN Shouqi, HE Wenting, SI Qiaorui, et al. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in centrifugal pump based on MUSIG model [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(4): 325-330.
- [8] 王彦伟, 许继洋, 李育房. 叶轮开孔参数对气液两相高速离心泵的影响 [J]. *化学工程*, 2024, 52(8): 71-77.
WANG Yanwei, XU Jiyang, LI Yufang. Influence of impeller perforation parameters on performance of high-speed gas-liquid centrifugal pump [J]. *Chemical Engineering(China)*, 2024, 52(8): 71-77.
- [9] ZHU Jingyu, DU Yanlian, LI Meng, et al. Evaluate the performance of the vertically upward gas-liquid two-phase flow in an airlift pump system [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 181: 105016.
- [10] HENG Yaguang, CHEN Zhengsu, JIANG Qifeng, et al. Performance and internal flow pattern analyses of a specific centrifugal disc pump under air-water two-phase flow conditions [J]. *Energy*, 2024, 309: 132981.
- [11] 杨晨宇, 徐强, 常亮, 等. 含气率对深海多相混输泵性能影响的数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(6): 1479-1485.
YANG Chenyu, XU Qiang, CHANG Liang, et al. Numerical study on the effect of gas void fraction on the performance of deep-sea multiphase pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(6): 1479-1485.
- [12] 姚学良, 吴声龙, 朱磊, 等. 含气率对循环水泵内部流动特性的影响 [J]. *水泵技术*, 2024(4): 1-6.
YAO Xueliang, WU Shenglong, ZHU Lei, et al. Influence of gas content on the internal flow characteristics of circulating pumps [J]. *Pump Technology*, 2024(4): 1-6.
- [13] LI Chenhao, LUO Xingqi, ZHANG Lefu, et al. Numerical calculation and analysis of gas-liquid two-phase flow in a centrifugal multiphase pump for deep-sea mining [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 163(1): 012045.
- [14] 戴晓宇, 徐强, 杨晨宇, 等. 多级混流式混输泵气液两相增压特性 [J]. *化工学报*, 2025, 76(2): 554-563.
DAI Xiaoyu, XU Qiang, YANG Chenyu, et al. Study on gas-liquid two-phase pressurization characteristics of multistage mixed-flow multiphase pump [J]. *CIESC Journal*, 2025, 76(2): 554-563.
- [15] 苏筱斌, 徐强, 杨晨宇, 等. 离心泵内气液两相流动的数值模拟与实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(8): 2396-2402.
SU Xiaobin, XU Qiang, YANG Chenyu, et al. Nu-

- merical simulation and experimental study of gas-liquid two-phase flow in a centrifugal pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(8): 2396-2402.
- [16] WU Xitong, LI Chenhao, LUO Xingqi, et al. Description of phase separation motion in gas-liquid two-phase flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 181: 104998.
- [17] 孙强, 谢福寿, 张森, 等. 泵间管内多股液氧/气氧直接接触冷凝数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(7): 169-178.
- SUN Qiang, XIE Fushou, ZHANG Miao, et al. Numerical investigation on direct contact condensation of multiple liquid oxygen/gas oxygen flow in inter-pump tube [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(7): 169-178.
- [18] 肖业祥, 刘洁, 李海军, 等. 不同叶顶间隙下进口含气率对混输泵做功性能的影响 [J]. *排灌机械工程学报*, 2025, 43(3): 217-223.
- XIAO Yexiang, LIU Jie, LI Haijun, et al. Effect of inlet gas volume fraction in different tip clearances on work performance of multiphase pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2025, 43(3): 217-223.
- [19] 魏笑笑. 液环泵轴向叶顶间隙复杂气液两相流动控制及性能优化研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [20] 靳志鸿, 胡锦涛, 李志刚, 等. 液氧涡轮泵阻尼密封设计与动力学特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(9): 43-53.
- JIN Zhihong, HU Jinhua, LI Zhigang, et al. Investigation on the structural design and rotordynamic characteristics for the damper seal in a liquid oxygen turbopump [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(9): 43-53.
- [21] LI Chenhao, LUO Xingqi, FENG Jianjun, et al. Effect of diversion cavity geometry on the performance of Gas-liquid two-phase mixed transport pump [J]. *Energies*, 2020, 13(8): 1882.
- [22] GAD M, GAO Bo, NI Dan, et al. Influence of internal flow structure on flow energy losses in a centrifugal pump with splitter blades using entropy generation theory [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 55: 102936.
- [23] WANG Zhiqi, YANG Huya, XIA Xiaoxia, et al. Optimization of a radial inflow turbine rotor with splitter blades based on entropy production theory and artificial neural network [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 252: 123759.
- [24] 孙殿新. 分流叶片前缘形状对叶片式混输泵性能的影响 [J]. *石油机械*, 2024, 52(11): 114-121.
- SUN Dianxin. Influence of the front shape of splitter vanes on the performance of the vane type multiphase pump [J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(11): 114-121.
- [25] 陈春刘, 原野, 韩剑英, 等. 分流叶片长度及周向位置对氢气离心压气机气动性能的影响 [J]. *天津理工大学学报*, 2025, 41(1): 29-35.
- CHEN Chunliu, YUAN Ye, HAN Jianying, et al. Influence of splitting blade length and circumferential position on the aerodynamic performance of hydrogen centrifugal compressor [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2025, 41(1): 29-35.
- [26] XU Zixuan, LI Zhenggui, WANG Weijun, et al. Influence of gas content on performance effect on shunt vane type aviation fuel pump [J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2022, 15(1): 121-129.
- [27] 张恒, 刘雷, 刘立军. 非均匀入流对CAP1400核主泵内流及性能的影响研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(2): 39-48.
- ZHANG Heng, LIU Lei, LIU Lijun. Effect of non-uniform inflow on the internal flow and performance of the reactor coolant pump in CAP1400 system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(2): 39-48.
- [28] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [29] REESE H, SCHÄDEL R, REUTER F, et al. Microscopic pumping of viscous liquids with single cavitation bubbles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 944: A17.
- [30] 高一博, 耿琳琳, 王振, 等. 基于欧拉-欧拉方法的气液两相流数值模型发展综述 [J]. *力学与实践*, 2022, 44(5): 1021-1036.
- GAO Yibo, GENG Linlin, WANG Zhen, et al. A review of numerical models development for gas-liquid two-phase flow based on Eulerian-Eulerian method [J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(5): 1021-1036.
- [31] 冯慧敏, 时鸾, 刘晓东, 等. 进口含气率对离心泵失速工况流动特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(2): 66-75.
- FENG Huimin, SHI Luan, LIU Xiaodong, et al. Influence of inlet gas volume fraction on the flow characteristics of centrifugal pump under stall conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(2): 66-75.

(编辑 武红江)