

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.236>



大洋钻探井下流体取样离心泵流动特性及性能解析

吴 川¹, 黄舟舟¹, 刘天乐^{2*}, 田烈余³, 熊 亮³, 雷 刚², 郑少军², 蒋国盛²

1. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074
3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 511458

摘 要: 为提升大洋钻探井下流体原位取样系统的稳定性与效率, 基于计算流体动力学方法, 构建了取样离心泵三维湍流模型, 并系统分析了其在 1 450 r/min 至 4 000 r/min 转速范围内的压力分布、速度场、阻力特性及能量损失规律。结果表明 2 000 r/min 为最优转速, 在此转速下泵内压力场可达 8 030 Pa 且最为稳定, 同时最大流速为 3.46 m/s 且速度分布合理。此外, 该转速下多相流与单相流的阻力系数差值最小, 并且流速波动仅为 0.23%, 取样体积最大误差为 4.75%, 表现出优异的流动稳定性与取样精度。在效率方面, 泵的峰值效率约 62.7%, 对应最优流量为 2×10^{-4} m³/s。同时泵体采用钛合金材料并控制流量在高效区间, 可保障泵在深海复杂介质环境中的长效可靠运行。

关键词: 大洋钻探; 流体取样; 离心泵; 性能仿真; 材料磨损; 离心泵。

中图分类号: TH311

文章编号: 1000-2383(2026)08-3213-11

收稿日期: 2026-06-13

Flow Characteristics and Performance Analysis of Centrifugal Pumps for Fluid Sampling in Deep Ocean Drilling Wells

Wu Chuan¹, Huang Zhouzhou¹, Liu Tianle², Tian Lieyu³, Xiong Liang³, Lei Gang², Zheng Shaojun², Jiang Guosheng²

1. School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
2. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 511458, China

Abstract: To enhance the stability and efficiency of the in-situ fluid sampling system for deep-sea drilling, this study, based on computational fluid dynamics (CFD) methods, constructed a three-dimensional turbulence model for the sampling centrifugal pump. A systematic analysis was conducted on its pressure distribution, velocity field, drag characteristics, and energy loss patterns within the rotational speed range of 1 450 r/min to 4 000 r/min. The results indicate that 2 000 r/min is the optimal rotational speed. At this speed, the pressure field within the pump reaches 8 030 Pa and is most stable, with a maximum flow velocity of 3.46 m/s and a reasonable velocity distribution. Furthermore, at this speed, the difference in drag coefficients between multiphase flow and single-phase flow is minimal, and the flow rate fluctuation is only 0.23%. The maximum error in sampling volume is 4.75%, demonstrating excellent flow stability and sampling accuracy. In terms of efficiency, the peak efficiency of the pump is approximately 62.7%, corresponding to an optimal flow rate of 2×10^{-4} m³/s. Additionally, the pump body is constructed

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2024YFC2814304)。

作者简介: 吴川(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钻探装备智能化及随钻测量仪器的研发工作。ORCID:0000-0002-7275-0295. E-mail:wuchuan@cug.edu.cn

*** 通信作者:** 刘天乐, ORCID:0000-0003-2879-1222. E-mail:liutianle2008@163.com

引用格式: 吴川, 黄舟舟, 刘天乐, 田烈余, 熊亮, 雷刚, 郑少军, 蒋国盛, 2026. 大洋钻探井下流体取样离心泵流动特性及性能解析. 地球科学, 51(8):3213-3223.

Citation: Wu Chuan, Huang Zhouzhou, Liu Tianle, Tian Lieyu, Xiong Liang, Lei Gang, Zheng Shaojun, Jiang Guosheng, 2026. Flow Characteristics and Performance Analysis of Centrifugal Pumps for Fluid Sampling in Deep Ocean Drilling Wells. *Earth Science*, 51(8):3213-3223.

from titanium alloy and the flow rate is controlled within the high-efficiency range, ensuring long-term reliable operation of the pump in complex deep-sea media environments.

Key words: Ocean drilling; fluid sampling; centrifugal pump; performance simulation; material wear; centrifugal pumps.

0 引言

大洋钻探是人类探索地球深部结构、资源赋存及生命演化前沿的重大科学工程(冉焱等,2024;盛桂莲等,2025).大洋钻探过程中,通过封隔不同井下地层并配合井下流体取样技术,可精准获取不同层位未受扰动的流体样品.相关流体样品对于解析热液系统演化规律、微生物促进硅循环和硅岩形成机制以及深部生物圈代谢途径等,均具有不可替代的科学意义,是深化地球系统认知的核心技术支撑(马乐天等,2025;史青等,2025).

鉴于此,国际大洋钻探计划部署了CORK系统(circulation obviation retrofit kit),用于对海底以下地壳中的流体及微生物进行监测及取样(Keir *et al.*, 2025;吕阳等,2025).CORK系统的流体取样装置依靠渗透膜实现被动式的取样(方家松等,2017;艾杨等,2025),存在采样速率不可调、易受流体粘度与微粒影响、难以突破大体积或触发式采样等固有局限(崔淑英等,2025).采用井下主动式的泵吸方案则可有效控制采样精度及取样量(王玉青等,2020;李霞颖等,2022).然而泵送单元在深海高压、低温环境中运行时,其机械运动部件易出现材料疲劳与密封失效等问题(龙泉行等,2025),有待进一步展开研究.

国内外目前相关研究多集中在CORK系统的完善上,主要在两个方面.一是对CORK系统本身进行整体性改进(穆贵鹏等,2021;周明高等,2022),着力提升其取样操作的便捷性及样品的保真度,并增强传感器集成与数据通信能力(Lin *et al.*, 2020;姜传隆等,2022).二是针对取样过程本身进行优化,探索了包括气体推动式(李琦等,2019;李霞颖等,2023)、探针式(于化龙等,2022;张国栋等,2025)等在内的多种新型取样方法.然而现有研究缺乏对泵吸采样方案内部流动机制、能量损耗特性及长期运行稳定性的深入分析,

更罕有将水力性能仿真与环境适应性评估相结合的系统研究,制约了取样装置实现低扰动、高保真及长周期流体取样的能力.

针对上述不足,本文采用计算流体动力学数值模拟的方法,建立大洋钻探流体取样离心泵内多相流动数值模型,系统模拟其在高压、低温及含杂质流体条件下的内部流动特性,揭示转速、介质组成对泵效、压力脉动与流动稳定性的影响规律,从而为泵的长效可靠运行提供全方位的设计依据,并为下一代多层位封隔观测系统的研发提供技术支撑.

1 流体取样方案

大洋钻探井下流体取样方案如图1所示.为精确解析不同深度地层流体的化学与生物学特征,避免层间流体的混杂干扰,系统采用了高性能的封隔器模块,将钻孔密封分隔为多个不同深度的独立层段,并在井口安装集控装置,在最小化扰动的前提下,将指定封隔层段中的原位流体,以受控的流速持续输送至位于井口的取样器中.当取样容量及时间间隔满足科学需求后,利用大洋钻探船下放ROV进行取样器的收取及重新布放.

2 模型构建及仿真设置

2.1 物理模型与基本假设

取样器依赖电池供电,且所抽取的流体可能存在气-液-固多相形态,其驱动泵的设计需兼顾低功耗、运行稳定性以及对特定多相介质的适应性.为此文中对拟采用的离心泵通过数值分析的方法,系统考察其不同转速及流体介质下的功率、扬程和流量变化规律,获取其内部的流动特性与压力分布.

根据水泵的性能参数与结构尺寸,采用速度系数法对水泵相关性能参数进行初步计算与选取.离心泵的相关参数如表1所示.

表 1 离心泵相关参数
Table 1 Relevant parameters of centrifugal pump

进口直径	出口直径	叶轮进口直径	叶轮出口直径	叶片出口角	叶片进口角	叶片数	叶片厚度	叶轮锥角
15 mm	15 mm	17 mm	40 mm	45°	25°	6	2.2 mm	80°

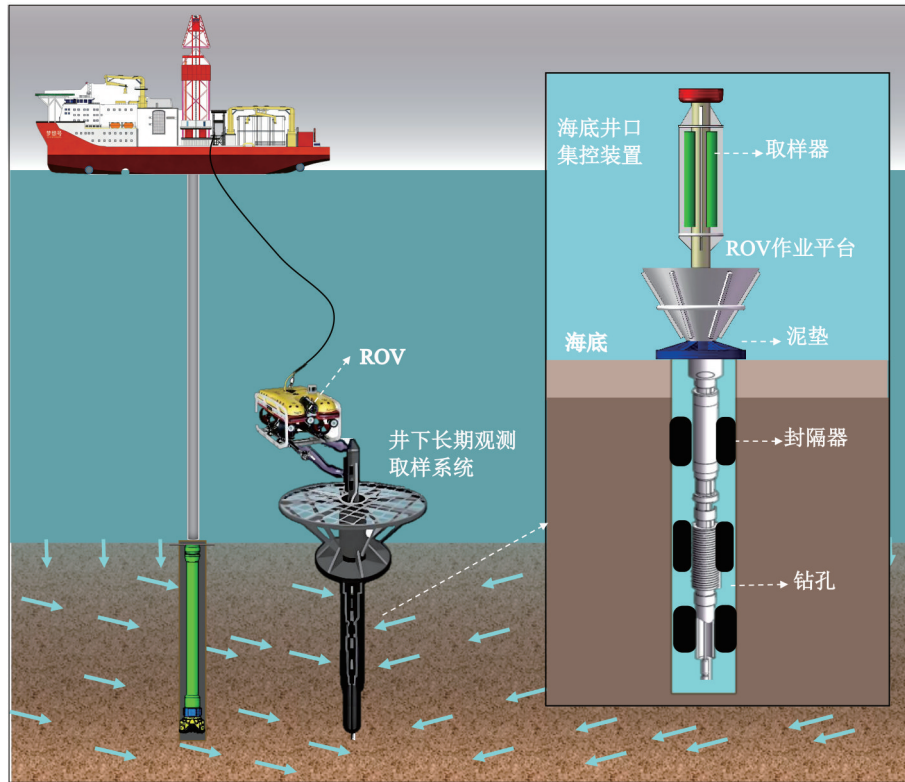


图1 流体取样方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fluid sampling plan

模型构建时,作出的基本假设为牛顿流体,且流动为三维、粘性、湍流流动.研究方法选择稳态,忽略流动过程中的传热效应,流体物性按深海实际保持恒定,不随温度变化.所采用的核心控制方程为Navier-Stokes方程,如公式(1)所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

式中: ∇ 是向量微分算子; ρ 为流体密度(kg/m^3); $\vec{v}$ 为流体速度矢量(m/s).

由于涉及的流体可被视为不可压缩或弱可压缩的流动,此时密度 ρ 可视为常数,因此方程(1)可简化为(2):

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (2)$$

式中: p 为静压(Pa); $\bar{\tau}$ 为包含层流粘性应力与由湍流脉动引起的雷诺应力的总应力张量; $\vec{g}$ 为重力体积力; $\vec{F}$ 为可能存在的其他体积力,在本研究设定的工况中,未引入旋转坐标系力、多孔介质阻力、电磁力或离散相作用力等其他体积力,故取 $\vec{F}=0$,以使数学模型封闭.

考虑到离心泵内部流道曲率大、旋转强烈并存

在流动分离,选用对逆压梯度和近壁流动预测更优的剪切应力输运 $k-\omega$ 模型,通过求解湍动能 k 和比耗散率 ω 的两个输运方程来计算湍流涡粘性,如公式(3)、(4)所示:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \vec{F}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tilde{P}_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + D_\omega \vec{F}, \quad (4)$$

式中: μ 为分子粘性($\text{Pa}\cdot\text{s}$); μ_t 为湍流涡粘系数; $\tilde{P}_k$ 为湍动能生成项; D_ω 为交叉扩散项; ω 为比耗散率; k 为湍动能(J/kg);其余为模型常数.

2.2 网格划分与求解设置

数值模拟前需对计算域进行离散化处理.文中采用混合网格策略,主体区域使用四面体网格,并在关键局部区域应用结构化六面体网格.近壁面区域采用增强壁面处理,对壁面第一层网格高度进行严格控制,无量纲壁面距离 y^+ 值均控制在 $y^+ \leq 5$ 范

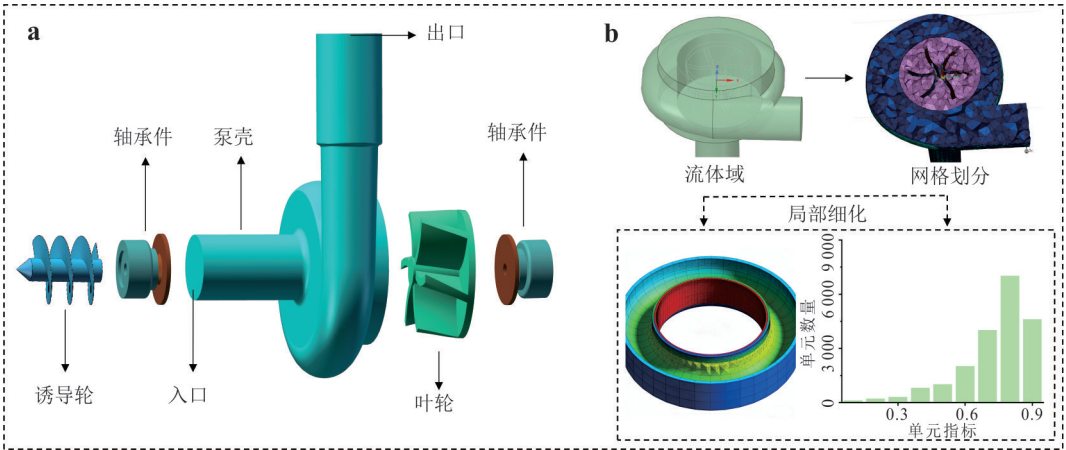


图2 离心泵模型及网格划分

Fig. 2 Centrifugal pump model and grid generation

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid-independence verification

方案	网格数量(万)	网格畸变率	效率
Grid-1	1.0	0.262	58.4%
Grid-2	1.5	0.275	61.4%
Grid-3	2.0	0.281	62.7%
Grid-4	2.5	0.283	62.4%

围内,其中主体流动区域的 y^+ 值稳定在 $y^+\approx 1$. 为确保计算结果不受网格密度影响,进行了网格无关性验证,分析不同网格规模下设计工况的水泵扬程与效率变化规律. 如表2所示结果可知,当网格数量超过两万时,关键性能参数的仿真值随网格数增加的变化幅度较小. 基于此计算精度与效率的平衡点,最终选定包含两万个单元的网格方案用于后续仿真计算.

为准确模拟深海高压环境下泵吸流体样本的真实工况,在ANSYS Fluent环境中基于物理模型与控制方程对计算域进行了边界条件设置. 进口边界采用质量流量进口条件,指定设计工况对应的质量流量值,出口边界则设定为静压出口. 湍流强度依据泵进口流动特性设定为5%. 针对叶轮旋转域与静止泵壳域之间的动静干涉问题,计算采用多重参考系模型,将包含叶轮与诱导轮的流体区域定义为旋转参考系并赋予相应转速,其余静止流道区域定义为静止参考系. 流体介质物性参数按实际工作环境设置,见表3. 求解过程始于进口的混合初始化,以获得合理的初始流场. 后续计算在双精度模式下进行迭代,持续监控方程残差及泵关键性能参数的变化,直至其达到稳定状态作为收敛判据.

表 3 流体物性值

Table 3 Fluid physical property values

物性参数	符号	数值	单位
密度	ρ	1 028	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
温度	T	4	$^{\circ}\text{C}$
动力黏度	μ	1.90×10^{-3}	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
运动黏度	ν	1.85×10^{-6}	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
饱和蒸气压	P_v	8.0×10^2	Pa
表面张力	σ	7.45×10^{-2}	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$

表 4 实验自变量

Table 4 Experimental independent variable

转速(r/min)	相态	多相体积分
1 450	单/多	2.3% 气+97.5% 液+0.2% 固
2 000	单/多	
2 900	单/多	
4 000	单/多	

仿真模拟选取1 450 r/min至4 000 r/min 4个特征转速,覆盖常规至高速典型工况,并对比单向流与多相流条件(如表4所示). 仿真过程中同步监测压力、流速、阻力及驱动力矩等关键参数,系统分析转速变化对系统流量、压力损失、流速分布、工作效率以及功率的影响规律.

3 数值分析

3.1 压力分布特性

图3所示压力分布云图显示转速对流场影响显著. 1 450 r/min工况时压力场均匀稳定,最大压力约7 940 Pa,压力波动极小,压力损失可忽略,有利于维持介质原始状态,但压力储备与取样效率较

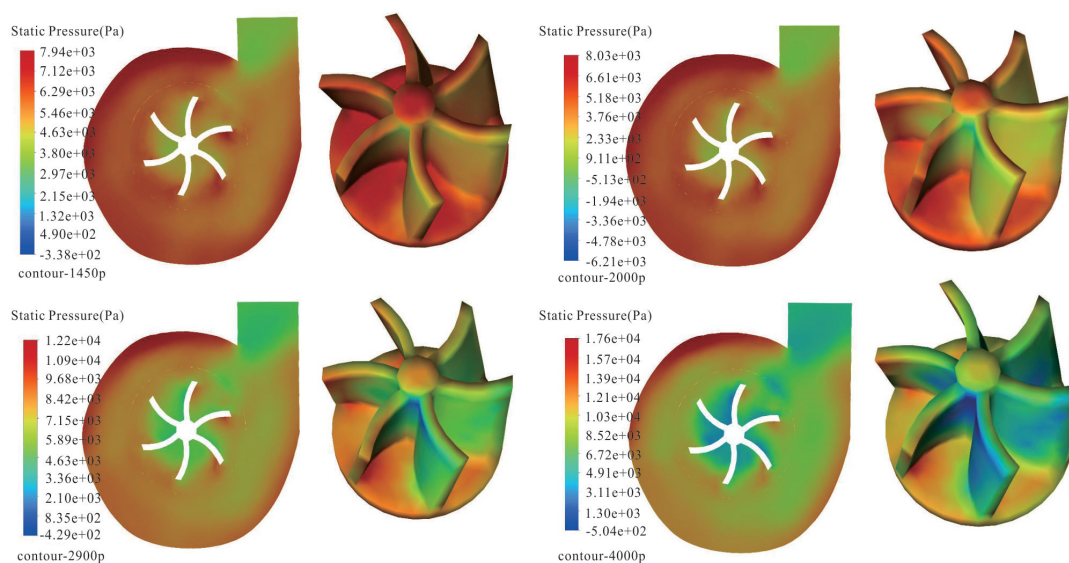


图3 压力分布云图

Fig. 3 Pressure distribution contour plot

低. 2 000 r/min 工况时最大压力约 8 030 Pa, 压力过渡总体平顺, 仅叶轮边缘存在局部压力分层, 实现了压力稳定性与取样效率的较好平衡, 轻微波动导致有限压力损失, 优化出口型线可改善. 2 900 r/min 工况时最大压力升至 12 260 Pa, 压力梯度显著增大, 取样动力增强同时压力损失与波动加剧, 需优化叶轮及流道设计平缓压力分布. 4 000 r/min 工况时压力高达 17 600 Pa, 流场紊乱伴随大面积低压区, 引发严重压力损失及气蚀风险, 损害取样代表性并威胁设备安全, 应避免用于取样. 因此海底井下流体取样时最佳匹配转速为 2 000 转左右, 可实现压力场的合理化控制.

3.2 速度分布特性

由图 4 所示速度分布结果可知, 1 450 r/min 工况时最大流速为 2.61 m/s, 蜗壳全域呈现均匀低速特征, 叶轮叶片间速度分布高度一致, 仅叶片边缘存在局部抬升. 该工况流速损失可忽略, 但整体流速不足使取样效率较低. 2 000 r/min 工况时最大流速为 3.46 m/s, 蜗壳边缘区流速显著提升, 叶轮内部形成平缓速度梯度, 实现取样效率与稳定性平衡. 2 900 r/min 工况时最大流速为 4.06 m/s, 导致叶轮区速度抬升显著, 蜗壳近叶轮区域同步增强. 速度梯度增大会加剧取样速度损失, 长期运行需优化流道子午型线平缓速度过渡. 4 000 r/min 工况时最大流速为 5.41 m/s, 伴随蜗壳与叶轮流场紊乱, 高低速区无序交错引发流动分离, 该工况将大幅增加速度损失并导致介质混合不均, 必须规避. 因此海底井

下流体取样时的最佳流速应控制在 2.61 m/s 至 3.46 m/s 区间内, 可兼顾取样效率与稳定性.

3.3 阻力变化规律

图 5 所示结果表明在不同转速下, 单向流和多相流均呈现先波动后趋于稳定的变化趋势, 但单相流的阻力系数整体低于多相流. 随着转速升高, 二者阻力系数的差异值从 0.6 逐渐降低至 0.2, 在高转速下趋于一致. 具体而言, 在 1 450 r/min 转速条件下, 多相流因分散相分布不均而产生明显的局部节流效应, 导致其稳态阻力显著高于单相流. 随着转速提升至 2 000 r/min, 湍流作用增强, 相分布趋于均匀, 局部阻力相应减弱, 两者阻力差值减小. 当转速进一步提高至 2 900 r/min 时, 强湍流促使分散相均匀悬浮, 相间阻力得到抑制, 多相流与单相流的稳态阻力趋于接近. 在高转速 4 000 r/min 时, 高湍流已足以使分散相充分裹挟于连续相中, 界面效应基本消除, 两者阻力特性几乎相同.

可见, 随着转速增加, 湍流剪切作用增强, 可有效破坏分散相的聚集结构, 促使其形成均匀悬浮流型, 从而显著降低因相界面效应与局部节流引起的附加阻力. 同时, 多相流相对于单相流的额外阻力并非固定值, 而是主要取决于分散相的空间分布形态, 即流型. 因此海底井下流体取样时适当提高运行转速可增强湍流混合作用, 促进介质均匀分布, 降低相间阻力, 从而有助于获得更稳定的流体样本.

进一步基于阻力系数分析结果进行仿真可得图 6 所示阻力规律, 可见在 1 450 r/min 至 4 000 r/

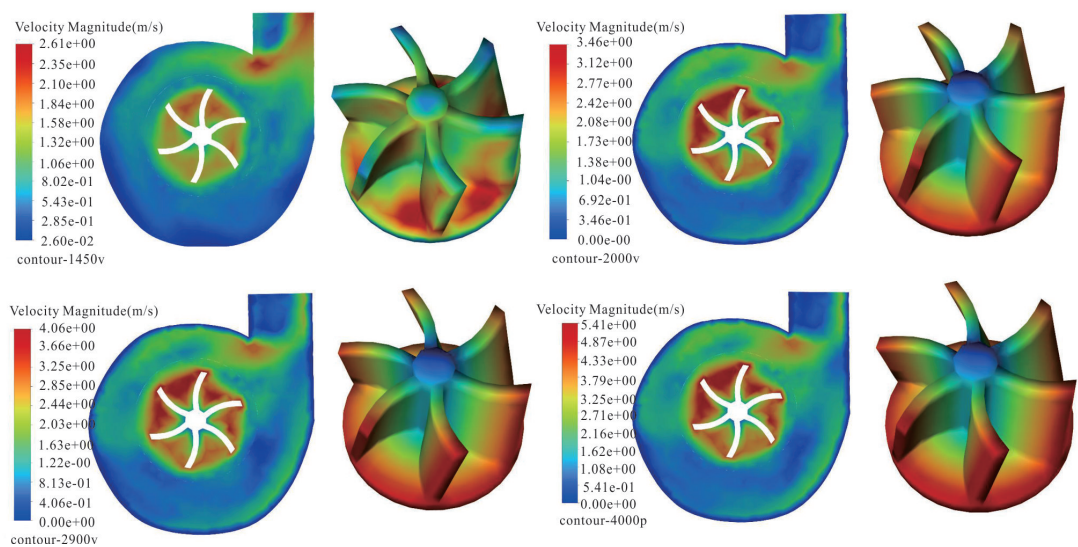


图 4 速度分布云图
Fig. 4 Speed distribution contour plot

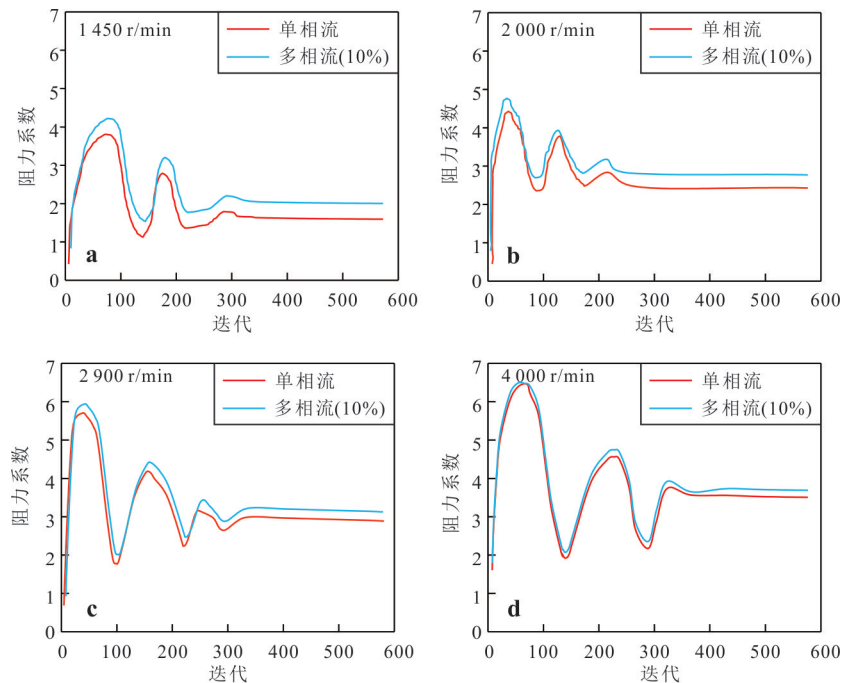


图 5 系统阻力系数
Fig.5 System resistance coefficient
a. 1 450 r/min阻力系数;b. 2 000 r/min阻力系数;c. 2 900 r/min阻力系数;d. 4 000 r/min阻力系数

min 转速范围内,10% 含率多相流的稳态阻力始终高于单相流.随着转速升高,多相流与单相流的阻力差值持续减小,至 4 000 r/min 时两者趋于一致.这表明初始阶段阻力波动幅值随转速升高而增强,这体现了系统在高转速下具有更强的动态响应能力,而各转速下阻力最终均收敛至稳定值,说明系统在宽工况范围内均具备良好的流动稳定性与自

调节能力.

3.4 力矩变化规律

由图 7 所示的不同转速工况下叶轮力矩的变化规律可知,所有工况下初始力矩均随流动启动快速下降,对应流动阻力初始波动阶段,随后收敛至稳态值.随着转速从 1 450 r/min 升至 4 000 r/min,单向流稳态力矩从 0.08 N·m 升至 0.23 N·m,且 10% 含

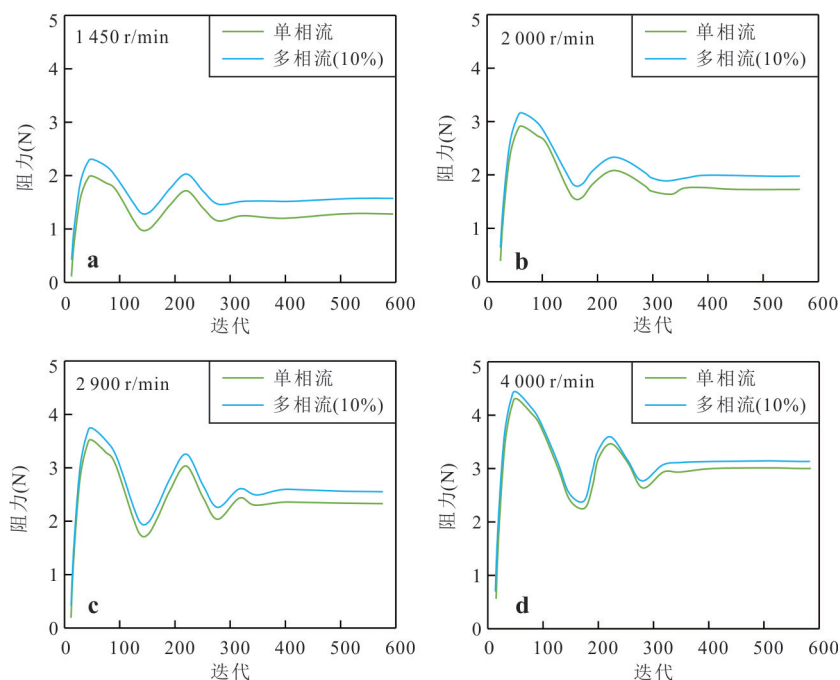


图6 系统阻力

Fig. 6 System resistance

a. 1 450 r/min阻力;b. 2 000 r/min阻力;c. 2 900 r/min阻力;d. 4 000 r/min阻力

率多相流的稳态力矩均略高于单相流,证明由分散相聚集和局部节流产生的附加阻力转化为了额外的叶轮负载.同时,多相流与单相流的稳态力矩差值持续减小,至4 000 r/min时两者基本重合,系统可以忽略分散相带来的额外负载,即多相流在负载层面上可被视为等效单相流进行处理和设计.低转速输出力矩较小,系统响应较慢,多相流中分散相的影响较为显著,负载波动相对明显,不利于工况的快速稳定.高转速下机械磨损加剧、振动与噪声增大、能耗显著上升,长期运行可能影响结构疲劳寿命与密封可靠性.因此海底井下流体取样时选取约2 000 r/min的转速,可在负载能力、运行平稳性、能耗与耐久性之间取得较好平衡.

3.5 流速变化规律

由图8所示出口流速的变化情况可知,随着转速从1 450 r/min升至4 000 r/min时,单相流的稳态速度从0.4 m/s升至2.1 m/s,多相流的稳态速度从0.2 m/s升至2.0 m/s,且多相流与单相流的稳态流速差值持续减小,至4 000 r/min时两者基本重合.高转速下流速趋同则表明湍流所提供的强烈动量交换,极大地提升了连续相对分散相的裹挟能力,使两相有效滑移减小,系统整体的能量传递效率因而接近于单相流动.该规律与高转速湍流混合削弱相界面效应、降低附加阻力的物理机制相符.相关

规律可为海底井下流体取样过程中效率与动态性能的平衡提供了理论依据,同时也可据此为预防堵塞或介质变化提供预警.

3.6 离心泵特性

如图9所示为取样泵性能曲线的综合分析结果,可见在4个转速工况下,扬程均随流量增大单调下降,而关死扬程随转速提高而增加.功率随流量增加持续上升,其上限值从1 450 r/min的45 W左右增至4 000 r/min的57 W左右.效率曲线呈抛物线形,其峰值始终出现在流量约 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 处.峰值效率随转速提升显著提高,从1 450 r/min的约50%增至4 000 r/min的约60%.性能变化规律表明扬程下降的原因在于流量增大引起流动损失增加以及叶轮做功效率的降低.功率上升则是单位时间内输送流体质量增加的结果.效率峰值所对应的最优流量区间在不同转速下保持在 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 附近,这进一步证实了在中高转速条件下湍流混合更为充分,使得在该特定流量附近的流动损失得到有效控制,系统能在较宽转速范围内维持较优的能量转换效率.

图10a所示的取样系统能量损失分布可知,系统能量损失主要包括容积损失、水力损失与机械损失.在不同转速下,各类损失的占比趋势呈现较高一致性,其中水力损失占比最大,主要由流道摩擦

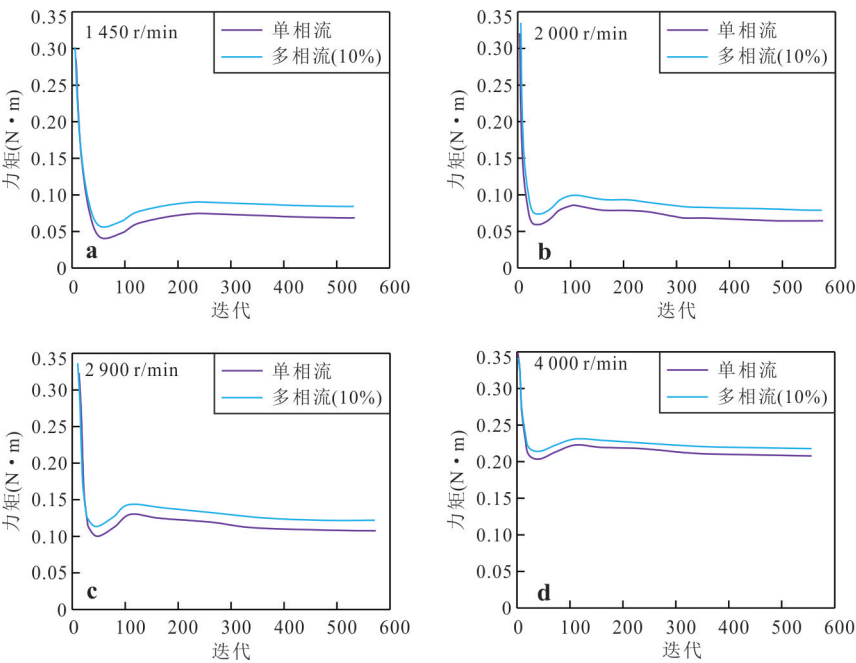


图 7 叶轮力矩

Fig. 7 Impeller torque

a. 1 450 r/min 叶轮力矩; b. 2 000 r/min 叶轮力矩; c. 2 900 r/min 叶轮力矩; d. 4 000 r/min 叶轮力矩

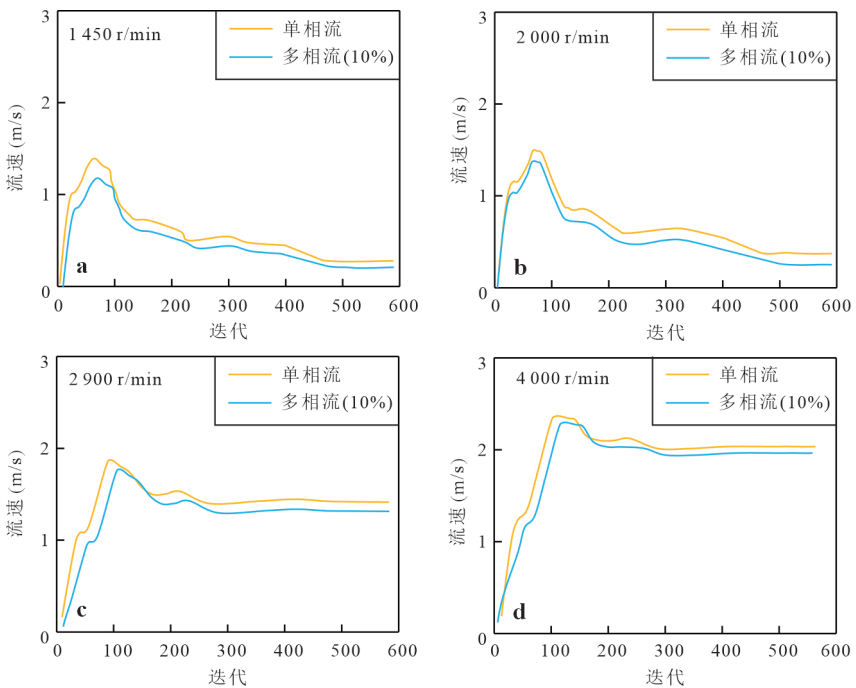


图 8 流速变化

Fig. 8 Flow rate variation

a. 1 450 r/min 流速; b. 2 000 r/min 流速; c. 2 900 r/min 流速; d. 4 000 r/min 流速

及局部涡流等现象引起,其占比随转速升高从 26% 增至 35%。机械损失占比次之,均低于 10%,主要源于轴承、密封件等部位的摩擦损耗。容积损失占比最小,由内部泄漏引起,在取样系统设计时可通过

结构优化予以控制。

图 10b 所示的在输送精度方面,取样泵在取样精度上表现出较高的可靠性,在单位时间内输送样本的体积与理论值的最大误差为 4.75%(图 10b)。

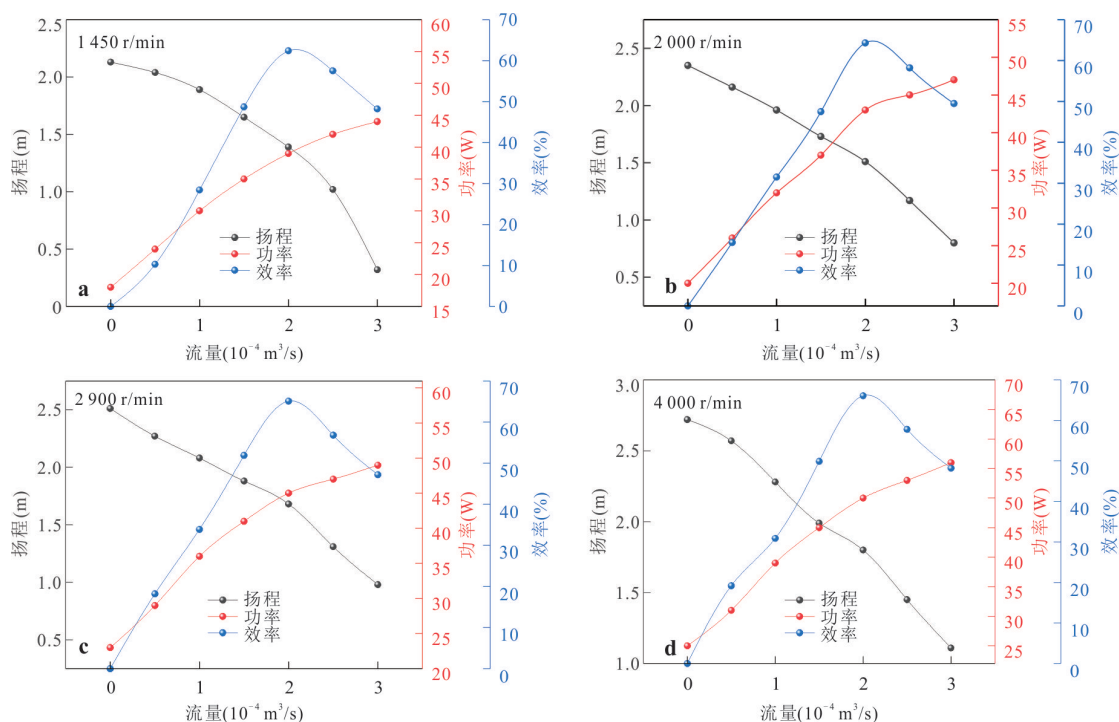


图9 性能曲线

Fig. 9 Performance curve

a. 1 450 r/min性能; b. 2 000 r/min性能; c. 2 900 r/min性能; d. 4 000 r/min性能

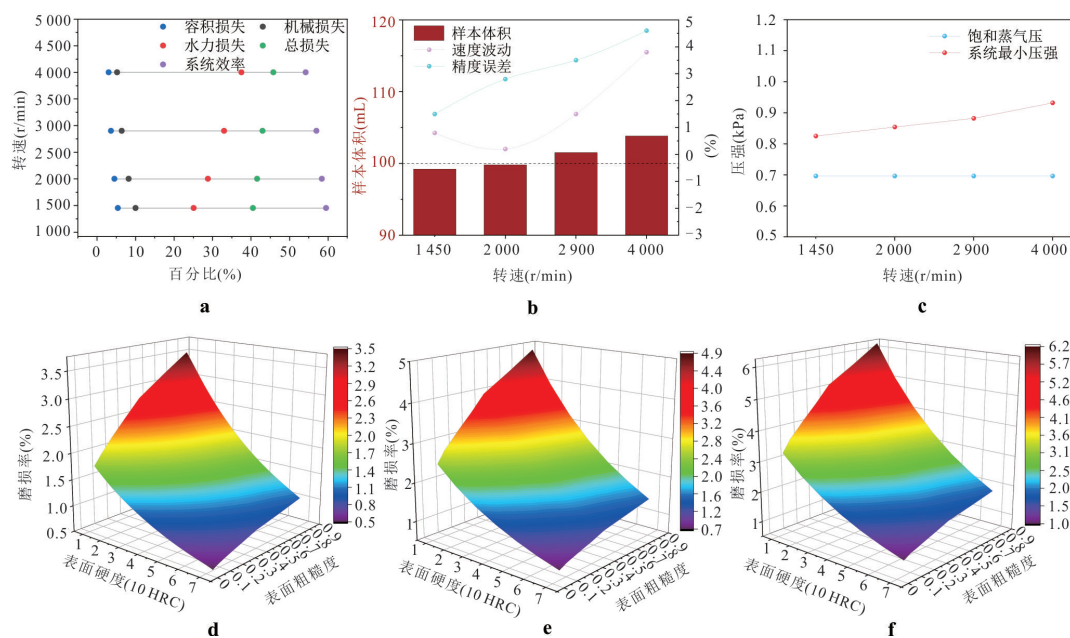


图10 综合性能与可靠性验证

Fig. 10 Comprehensive performance and reliability verification

a. 能量损失分布; b. 取样精度; c. 饱和蒸汽压与系统最小压强; d. 钛合金磨损率; e. 哈氏合金磨损率; f. 双相不锈钢磨损率

在确保取样精度的同时,流体持续输送速度受样本中多相组分的影响所产生的波动亦保持在较低范围内,最大波动幅度为3.89%;且在转速为2 000 r/

min时波动最小,仅为0.23%。此外,取样过程中系统最小压强始终高于样本的饱和蒸汽压(图10c),表明该系统在工作过程中未发生汽蚀现象。

进一步对泵体常用耐腐蚀材料的磨损行为进行了分析,选取钛合金、哈氏合金及双相不锈钢 3 种材料,在不同表面粗糙度与硬度条件下开展磨损测试仿真.如图 10d~10f 所示结果可知,钛合金、哈氏合金和双相不锈钢的最大磨损率分别为 3.52%、4.86% 与 6.20%,且磨损率随表面粗糙度增加而增大,随表面洛氏硬度提高而降低.

4 结论

本研究通过建立深海多相流离心泵全三维湍流数值模型,模拟了 1 450~4 000 r/min 转速范围内的泵内流动特性与性能表现,系统揭示了转速变化对泵内压力速度分布、多相阻力特性、能量损失规律及材料磨损行为的综合影响机制,得出以下主要结论:

(1) 提高运行转速能够增强湍流混合作用,促进分散相均匀分布,抑制相分离,有效降低多相流相间阻力并缩小其与单相流的性能差异,提升样品的代表性.

(2) 2 000 r/min 为深海流体取样的最佳转速.该工况下泵内压力场最为稳定,最大压力达 8 030 Pa;速度分布合理,最大流速为 3.46 m/s,流动平稳有序.

(3) 在 2 000 r/min 转速下,多相流与单相流的阻力系数差值最小,流速波动仅为 0.23%,取样体积最大误差控制在 4.75% 以内,显著提升了流动稳定性与取样精度.泵的峰值效率约 62.7%,对应的最优流量约为 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

(4) 流固耦合仿真表明,稳定的压力与均匀的速度分布可有效避免局部压力突变引发的气蚀与结构振动,并降低固相颗粒对壁面的不对称冲蚀,从而延长使用寿命.材料磨损分析进一步证实,钛合金在深海苛刻环境下的磨损率仅 3.52%.流场调控策略与材料优选方案的匹配,可为兼顾高取样效率、流动稳定性与设备长期耐久性及流道优化设计提供明确依据.

References

Ai, Y., Zang, L., Chen, B. Z., et al., 2025. Performance Optimization of Deep-Sea Microbial Sampling Device Based on Porous Step Model. *Mining Research and Development*, 45(9): 1–7 (in Chinese with English abstract).
Cui, S. Y., Song, G., Tian, Y. Y., et al., 2025. Development

of Long-Term Borehole Observation Systems in Ocean Drilling and Their Role in Seismic Monitoring. *Drilling Engineering*, 52(5): 1–9 (in Chinese with English abstract).
Fang, J. S., Li, J. Y., Zhang, L., 2017. 30 Years of Seafloor CORK Observations: Development, Applications and Prospects. *Advances in Earth Science*, 32(12): 1297–1306 (in Chinese with English abstract).
Jiang, C. L., Yan, T. J., Zhang, Y., et al., 2022. Optimization Method for Fidelity Parameters of Formation Fluid Fidelity Sampling Chamber While Drilling. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 403–410 (in Chinese with English abstract).
Keir, B., Earl, E. D., Andrew, T. F., et al., 2025. Monitoring Subseafloor Temperature and Fluid Pressure in Sealed ODP/IODP Boreholes to Constrain in Situ Hydrological State and Processes in Igneous Oceanic Crust. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 62(4): 658–683. <https://doi.org/10.1139/cjes-2024-0076>
Li, Q., Liu, X. H., Li, X. Y., et al., 2019. Environmental Monitoring and Sampling Technology for Shallow Subsurface Fluids Based on U-Tube Principle. *Environmental Engineering*, 37(2): 8–12+21 (in Chinese with English abstract).
Li, X. Y., Liu, X. H., Li, Q., et al., 2022. Fidelity Sampling Technology and Engineering Application of Shallow Subsurface Fluids. *Science Technology and Engineering*, 22(33): 14967–14975 (in Chinese with English abstract).
Li, X. Y., Liu, X. H., Li, Q., et al., 2023. Laboratory Verification of Gas-Driven Subsurface Fluid Sampling Technology. *Geological Journal of China Universities*, 29(1): 138–146 (in Chinese with English abstract).
Lin, H. T., Hsieh, C. C., Repeta, D. J., et al., 2020. Sampling of Basement Fluids via Circulation Obviation Retrofit Kits (CORKs) for Dissolved Gases, Fluid Fixation at the Seafloor, and the Characterization of Organic Carbon. *MethodsX*, 7: 101033. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101033>
Long, Q. X., Zhu, W. B., Wang, P., et al., 2025. Structural Design and Geometric Parameter Optimization of Magnetic Fluid Seals for Circulating Submersible Pumps. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 1–17 (in Chinese with English abstract).
Lyu, Y., Xiong, L., Tian, L. Y., 2025. Research Progress and Prospects of Long-Term Downhole Observation Devices for Ocean Scientific Drilling. *Drilling Engineering*, 52(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
Ma, L. T., Li, J. B., Feng, X. W., et al., 2025. Trends, Challenges and Prospects of International Standardization

- for Marine Observation and Detection Technologies. *Chinese Science Bulletin*, 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Mu, G. P., Zhang, G. Q., Tu, C. Z., et al., 2021. Improvement of Wireline Formation Fluid Sampling Technology and Its Application in Bohai Oilfield. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 37(9): 58—61 (in Chinese with English abstract).
- Ran, H., Zhang, T., 2024. Advances and Future Key Development Directions in Ocean Scientific Drilling Over the Past Decade. *Geology in China*, 51(3): 1091—1094 (in Chinese with English abstract).
- Sheng, G. L., Tao, H. L., Song, S. W., et al., 2025. Applications of Ancient DNA Research in the Field of Geobiology. *Earth Science*, 50(3): 1105—1121(in Chinese with English abstract).
- Shi, Q., Shi, X.Y., Jiang, G.Q., et al., 2025. Microbial Silicon Cycling Promoted Shallow-Sea Chert Deposition in Mesoproterozoic Ocean. *Earth Science*, 50(3): 1082—1104(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Q., Yuan, Z. T., Li, H. C., et al., 2020. Development and Comparative Sampling Test Analysis of a Diaphragm - Type Groundwater Sampling Pump. *Environmental Science & Technology*, 43(S2): 173—178 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H. L., 2022. Application of Downhole Fluid Sampler Testing Technology. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 8(6): 85—90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. D., He, Y. C., Wang, L., et al., 2025. Intermittent Pumping and Gas Cushion Combined Operation Sampling Technology for Ultra-Low Permeability Gas Reservoir. *Petroleum Drilling Techniques*, 53(3): 169—174 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. G., Zuo, Y. X., Xue, Y. Z., 2022. Development and Application of a Novel 3D Push-Type Adaptive Sealing Sampling System. *Progress in Geophysics*, 37(2): 938—944 (in Chinese with English abstract).
- 艾杨, 臧龙, 陈秉正, 等, 2025. 基于多孔阶跃模型的深海微生物取样装置性能优化研究. *矿业研究与开发*, 45(9): 1—7.
- 崔淑英, 宋刚, 田英英, 等, 2025. 大洋钻探孔内长期观测系统发展及其在地震监测中的作用. *钻探工程*, 52(5): 1—9.
- 方家松, 李江燕, 张利, 2017. 海底CORK观测30年:发展、应用与展望. *地球科学进展*, 32(12): 1297—1306.
- 姜传隆, 颜廷俊, 张杨, 等, 2022. 随钻地层流体保真取样筒保真参数优化方法. *石油勘探与开发*, 49(2): 403—410.
- 李琦, 刘学浩, 李霞颖, 等, 2019. 基于U型管原理的浅层地下流体环境监测与取样技术. *环境工程*, 37(2): 8—12+21.
- 李霞颖, 刘学浩, 李琦, 等, 2022. 浅层地下流体保真取样技术及工程应用. *科学技术与工程*, 22(33): 14967—14975.
- 李霞颖, 刘学浩, 李琦, 等, 2023. 气体推动式地下流体取样技术的室内验证. *高校地质学报*, 29(1): 138—146.
- 龙泉行, 朱维兵, 王鹏, 等, 2025. 循环液下泵磁流体密封的结构设计及几何参数优化研究. *机电工程*, 1—17.
- 吕阳, 熊亮, 田烈余, 2025. 大洋科学钻探井下长期观测装置研究进展及展望. *钻探工程*, 52(2): 1—9.
- 马乐天, 李家彪, 冯旭文, 等, 2025. 海洋观测和探测技术国际标准化的动态、挑战与展望. *科学通报*, 1—9.
- 穆贵鹏, 张国强, 涂春赵, 等, 2021. 电缆地层流体取样技术的改进及其在渤海油田的应用. *石油工业技术监督*, 37(9): 58—61.
- 冉皞, 张涛, 2024. 近十年大洋科学钻探进展与未来重点发展方向. *中国地质*, 51(3): 1091—1094.
- 盛桂莲, 陶华林, 宋世文, 等, 2025. 古DNA研究在地球生物学领域的应用. *地球科学*, 50(3): 1105—1121.
- 史青, 史晓颖, Jiang Ganqing, 等, 2025. 中元古代微生物硅循环促进浅海硅岩沉积. *地球科学*, 50(3): 1082—1104.
- 王玉青, 袁子婷, 李红超, 等, 2020. 隔膜式地下水取样泵的研制与取样对比试验分析. *环境科学与技术*, 43(S2): 173—178.
- 于化龙, 2022. 井下流体取样器测试技术的应用. *石油管材与仪器*, 8(6): 85—90.
- 张国栋, 何玉春, 王雷, 等, 2025. 特低渗气藏储层间歇性泵抽和气垫联合作业取样技术. *石油钻探技术*, 53(3): 169—174.
- 周明高, 左有祥, 薛永增, 2022. 新型3D推靠自适应坐封取样系统的研发与应用. *地球物理学进展*, 37(2): 938—944.

中文参考文献