

钻井液离心机关键部件内部流场 及冲蚀磨损特性研究

冯美贵^{1,2,3}, 刘一静², 朱丽娜^{2*}, 康嘉杰²

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083)

摘要: 钻井液固液分离过程中, 钻屑等固相颗粒会对离心机关键部件造成严重的磨损失效与动平衡失稳, 影响分离效果, 缩短使用寿命。基于稠密离散相(DDPM)模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了钻井液离心机内部流场特性。结合 Finnie 冲蚀模型预测了关键部件的冲蚀磨损性能。探究关于转鼓转速、颗粒浓度以及介质黏度对部件冲蚀磨损性能的影响。结果表明, 冲蚀主要集中在进料腔附近的螺旋输送机叶片以及转鼓锥部至沉淀出口处。随着转鼓转速的增加, 离心机各部件的冲蚀速率升高。颗粒浓度的提升会加剧各部件的冲蚀。此外, 介质黏度增加会降低转鼓内壁的冲蚀, 但会加剧螺旋壁冲蚀。研究结果为了解离心机的冲蚀磨损特性提供了有价值的见解, 并为在实际应用中优化离心机的运行和维护提出了建议。

关键词: 离心机; 钻井液; 固相颗粒; 固液分离; 冲蚀磨损; 螺旋输送机

中图分类号: P634.3; TE926 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0051-10

Study on the internal flow field and erosion wear characteristics of key components of drilling fluid centrifuge

FENG Meigui^{1,2,3}, LIU Yijing², ZHU Lina^{2*}, KANG Jiajie²

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: During the solid-liquid separation of drilling fluids, solid-phase particles such as drill cuttings will cause serious wear failure and dynamic balance instability to the key components of the centrifuge, affecting the separation effect and shortening the service life. The internal flow field characteristics of the drilling fluid centrifuge are simulated based on the dense discrete phase model (DDPM) and the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. The erosive wear performance of key components was predicted in combination with the Finnie erosion model. The effects of rotational speed, particle concentration, and medium viscosity on the erosion wear performance of the components were explored. The results show that the erosion is mainly concentrated on the blades of the screw conveyor near the feed cavity and at the bowl cone. The erosion rate of the centrifuge components rises as the rotational speed increases. Elevated particle concentration exacerbates the erosion of the components. While erosion on the inner wall of the bowl is reduced by an increase in medium viscosity, screw wall erosion is intensified. The research results provide valuable insights into the

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2025-03-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.007

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号: DD20243154); 国家自然科学基金项目(编号: 52275218); 深地国家科技重大专项课题“绿色高效精准智能化钻探技术集成”(编号: 2024ZD1003105)

第一作者: 冯美贵, 女, 汉族, 正高级工程师, 探矿工程专业, 从事地质钻探工艺研究、钻井液循环与废浆处理技术装备研发工作, 北京市海淀区学院路29号, rosy03250186@126.com。

通信作者: 朱丽娜, 女, 汉族, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事机械装备表面防护涂层先进制造以及机械装备的表/界面摩擦学及疏水行为研究工作, 北京市海淀区学院路29号, zhulina@cugb.edu.cn。

引用格式: 冯美贵, 刘一静, 朱丽娜, 等. 钻井液离心机关键部件内部流场及冲蚀磨损特性研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 51-60.

FENG Meigui, LIU Yijing, ZHU Lina, et al. Study on the internal flow field and erosion wear characteristics of key components of drilling fluid centrifuge[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 51-60.

erosive wear characteristics of centrifuges and recommendations for optimizing the operation and maintenance of centrifuges in practical applications.

Key words: centrifuge; drilling fluid; solid-phase particles; solid-liquid separation; erosion wear; screw conveyor

0 引言

钻井液是钻井工程的“血液”,是保证工程安全顺利实施、提高钻井效率、降低钻井综合成本的关键。然而,钻井液中颗粒浓度过高会造成更大的流动阻力和更多的动力消耗,影响机械穿透率和钻头的使用寿命。实践证明,钻井液中的固相含量每降低1%,钻进速度就会提高约10%。因此,作为固控系统的重要设备,钻井液离心机的工作性能直接关系到钻井液的质量,与钻井成本、效率和安全息息相关^[1]。

针对地质钻探,北京探矿工程研究所自主研制了小型化、轻量化、易搬迁的TGLW系列钻井液离心机^[2],利用有限元分析软件对离心机转鼓进行了强度仿真分析^[3]。目前已应用于山东三山岛矿区钻探现场、青海五龙沟整装勘查工程、甘肃文县阳山金矿区、新疆准东煤田勘查工程等^[4]。冯美贵等^[5]使用TGLW系列小型离心机,解决了绳索取心钻杆内壁结垢问题。温得全等^[6]开展小型一体化泥浆不落地循环处理工艺研究和自动化智能化控制装备研制,以满足固体矿产勘查钻探工程泥浆性能的维护和固控装备自动化的需求。蒋睿等^[7]提出了一套螺旋输送机全流程动平衡优化工艺,主要包括动平衡机的校准、定标、配重位置选择及剩余不平衡量的加重方法等,旨在降低剩余不平衡量、提高动平衡精度、缓解整机振动问题。

在以往钻井液离心机的研究中,研究人员关注离心机的设备研制及现场实施,但对离心机的磨损行为关注甚少。在使用过程中,固体颗粒在旋转部件表面的连续切削、碰撞会造成壁面的冲蚀磨损^[8]。钻井液离心机进料腔附近的叶片表面出现明显的减薄减短现象,转鼓锥体内壁也发生了轻微的损失和剥落,如图1所示。离心机旋转部件的冲蚀会引起转子的动平衡不稳定性,从而影响分离效果,缩短使用寿命^[7]。为了更准确地预测离心机的冲蚀磨损分布,通过数值模拟对离心机关键部件的冲蚀性能进行研究,探究了关键参数对旋转部件冲蚀速率的影响。研究结果有助于制定合理的离心机操作指南,开发高效、稳定和长寿命的离心机。



(a)螺旋输送机

(b)转鼓

图1 冲蚀磨损后的离心机旋转部件实物

Fig.1 Physical view of the centrifuge rotating components after erosion wear

1 理论模型

1.1 多相流模型

密集离散相模型(DDPM)是用于模拟密集颗粒流动的模式。DDPM模型采用欧拉-拉格朗日模型,将水视为连续相,将颗粒视为离散相,可精确模拟不同相之间的相互作用力和颗粒壁碰撞。

流体的守恒方程采用欧拉模型建立,连续性方程和动量方程分别表示为式(1)和式(2)^[9]。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot$$

$$[\alpha_i \mu_i (\nabla \vec{v}_i + \nabla \vec{v}_i^T)] + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \vec{F}_{\text{exchange}} \quad (2)$$

式中: α_i ——连续相流体的体积分数; ρ_i ——流体密度; ∇ ——水平垂直梯度算子; $\vec{v}_i$ ——连续相流体的速度矢量; p ——连续相压力; μ_i ——流体黏度; $\vec{g}$ ——重力加速度; $\vec{F}_{\text{exchange}}$ ——相间力矢量。

粒子轨迹由作用在粒子上的力平衡方程决定。利用拉格朗日方法计算粒子轨迹,并收集有关流体速度和粒子体积分数的信息。控制粒子轨迹方程表示为式(3)。

$$m_s \frac{d\vec{u}_s}{dt} = m_s \frac{3C_d}{4} \frac{|\vec{u}_s - \vec{v}_f|}{d_s} (\vec{v}_f - \vec{u}_s) + m_s \frac{\vec{g}(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} + m_s \frac{\rho_f}{\rho_s} \vec{v}_f \nabla \vec{v}_f + \vec{F}_{\text{KTGF}} \quad (3)$$

式中: m_s ——离散相颗粒的质量; $\vec{u}_s$ ——颗粒速度矢量; t ——时间; C_d ——阻力系数; d_s ——颗粒直径; ρ_s

——颗粒密度; $\vec{F}_{KTGF}$ ——附加质量力。

方程右侧有四个项,分别代表阻力、浮力、压力梯度力和附加质量力。与DPM方法相比, F_{KTGF} 被添加到DDPM模型中,以表示粒子间碰撞和平移产生的力。

1.2 湍流模型

采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型模拟三维非恒定不可压缩流场,该模型提高了高应变率和高流线曲率的精度。连续相的湍流动能(k)和耗散率(ϵ)分别用式(4)和式(5)表示^[10]。

$$\frac{\partial(\rho_i k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho_i \frac{\epsilon^2}{k} - R\epsilon \quad (5)$$

式中: u_i ——速度分量; μ_t ——湍流黏度; σ_k ——湍流动能的普朗特数; G_k ——由平均速度梯度引起的湍流动能; G_b ——浮力引起的湍流动能; Y_M ——可压缩湍流中脉动扩张引起的耗散率; σ_ϵ ——耗散率的湍流普朗特数; C_1 、 C_2 、 C_3 ——经验常数; $R\epsilon$ ——附加耗散项,用于改进模型在复杂流动中的预测精度。

1.3 冲蚀模型

选用Finnie模型作为冲蚀模型模拟壁面的损伤情况,该模型有效地描述了颗粒撞击角度、撞击速度以及颗粒与目标之间的相互作用机制,具有很高的可靠性和计算精度。

控制Finnie模型的方程见式(6)^[11],冲击角函数 $f(\gamma)$ 由公式(7)定义^[12]。

$$E = K v_p^n f(\gamma) \quad (6)$$

$$f(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{3} \cos^2 \gamma & (\tan \gamma > \frac{1}{3}) \\ \sin 2\gamma - 3 \sin^2 \gamma & (\tan \gamma \leq \frac{1}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: E ——无量纲质量(去除的材料质量除以颗粒质量); K ——经验系数,反映了颗粒与壁面之间的相互作用; v_p ——颗粒的冲击速度; n ——颗粒速度指数; $f(\gamma)$ ——无量纲函数,取决于颗粒与试样之间的冲击角 γ 。

2 数值模型的构建

TGLW型离心机专为小口径地质钻探设计,具有小型化、轻量化、低能耗、易搬迁等特点。卧式螺旋沉降离心机的整体结构主要由螺旋输送机、转鼓、差速器、皮带轮、电机、液力耦合器、机座、机罩组成,如图2所示。

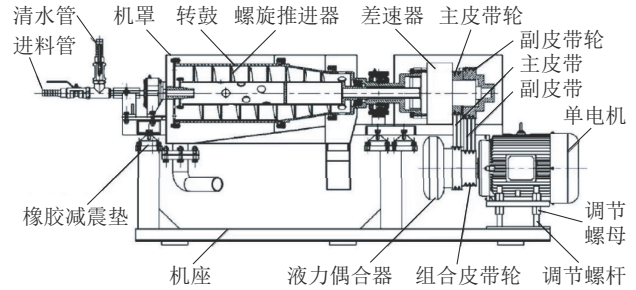


图2 卧式螺旋沉降离心机结构示意图^[2]
Fig.2 The structural diagram of horizontal screw sedimentation centrifuge

仿真主要针对旋转部件,包括螺旋输送机和转鼓部件。仿真前需对整体结构进行简化。简化工作包括将螺钉和螺柱的连接接头和加工孔转换为单一实体。此外,去除了不受应力集中影响区域的倒角和圆角,并取消了不影响刚度的外凸结构。垂直板和螺旋叶片之间保持了很小的间隙,以便于网格划分,确保对结果的影响最小^[3]。离心机旋转部件简化模型如图3所示。

卧式螺旋沉降型钻井液离心机的转鼓外径为366 mm,内筒直径为200 mm,柱体长度为342 mm,

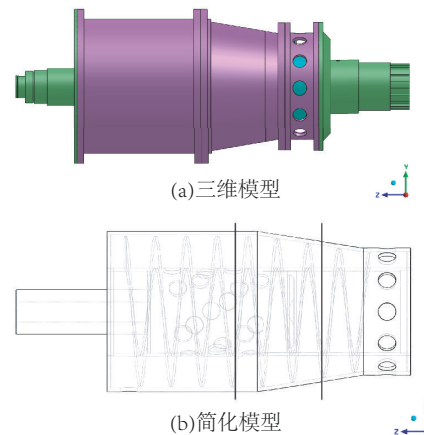


图3 卧式螺旋沉降离心机旋转部件的几何模型
Fig.3 Geometrical model of the rotating components of a horizontal screw sedimentation centrifuge

锥体长度为 350 mm,水池深度为 75 mm,半锥角为 9° ,螺杆螺距为 70 mm,叶片厚度为 5 mm。溢流出口处的方向被定义为 Z 轴的正方向,沉淀出口的中心点被定义为原点。离心机旋转部件结构示意图的两个截面如图 3 所示,选取离心机流场内部 $Z=200$ mm, $X=0$, $Y=0$ 和 $Z=400$ mm, $X=0$, $Y=0$ 两个截面作为数据分析的特征面^[13-14]。

使用预处理软件 Fluent Meshing 对计算域进行网格划分。考虑到网格的精度,在计算域中使用了多面体和六面体非结构元素,并设置了相应的边界层。模型包括 520120 个单元和 1810493 个节点。网格的正交质量为 0.861,偏斜度为 0.136,长宽比为 4.587,均符合模拟的精度要求。

压力和速度采用相耦合 SIMPLE 格式计算。此外,为减少计算量,其余方程均采用一阶迎风格式^[15]。固液两相流模型的计算选择了非加权水基钻井液。固相和液相参数分别设置,连续相为水,离散相为颗粒。两相均视为不可压缩流体。连续相密度为 1000 kg/m^3 ,黏度为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,离散相密度为 4000 kg/m^3 ,粒径为 $35 \mu\text{m}$ 。

模拟假设固体颗粒以与液体相同的速度从入口处的法线方向注入。入口设定为速度入口,速度为 5 m/s ,湍流强度为 5%,湍流黏度比为 10。固相出口和液相出口设置为流出口。转鼓与螺旋设置为旋转壁,壁面粗糙度恒定为 0.5,转鼓转速设置为 3000 r/min ,差转速设置为 20 r/min 。入口和出口壁设为逃逸边界,墙壁设为反弹边界^[16]。

3 结果与讨论

3.1 转鼓转速对冲蚀磨损的影响

转速是影响离心机冲蚀磨损的关键因素,通常使用变频电机或液压马达来调节转速。为探究转速对离心机部件冲蚀的影响,选取转速范围 $1500 \sim 4000 \text{ r/min}$ 的条件下进行模拟分析。

图 4、图 5 显示了不同转速下不同截面处离心机内部的流场变化。

转鼓的柱段压力明显大于转鼓锥段压力^[17]。随着转鼓转速由 1500 r/min 增长到 4000 r/min ,在 $Z=200 \text{ mm}$ 截面处,最大压力值由 175 kPa 增长 569 kPa ,最小压力值由 158 kPa 增长至 434 kPa ;在 $Z=400 \text{ mm}$ 截面处,最大压力值由 232 kPa 增长到 903 kPa ,最小压力值由 204 kPa 增长至 719 kPa 。绝对

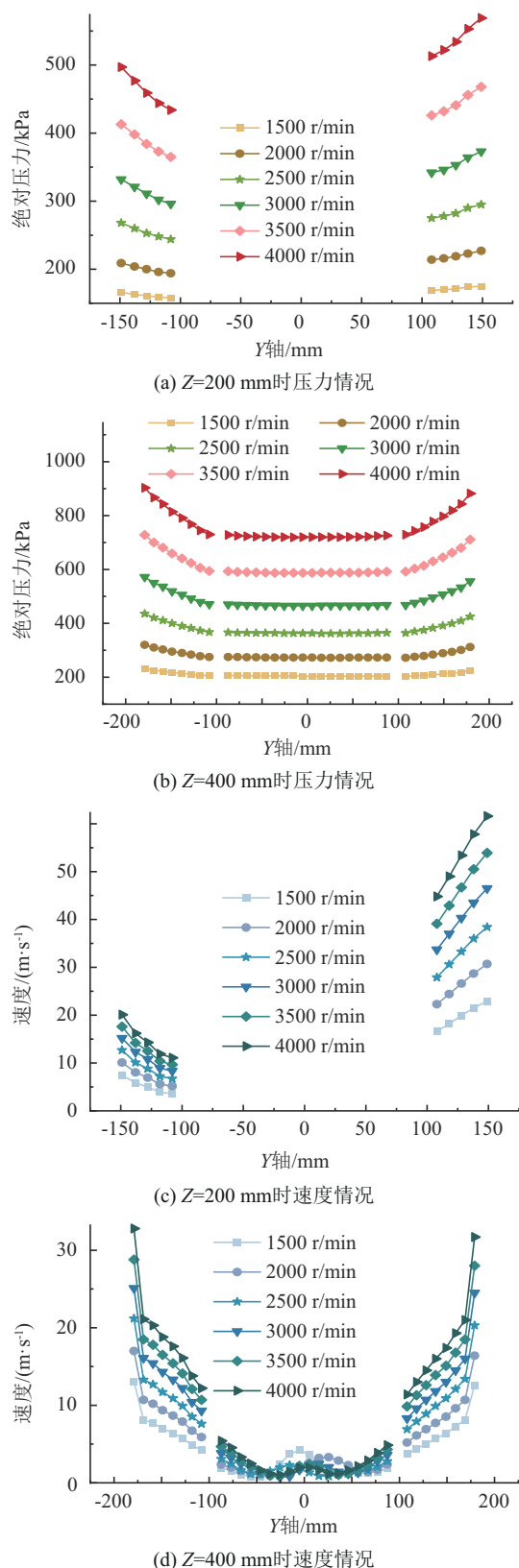


图 4 不同转速下离心机不同径向截面的流场曲线
Fig.4 Flow field curves of different sections of the centrifuge at various rotational speeds

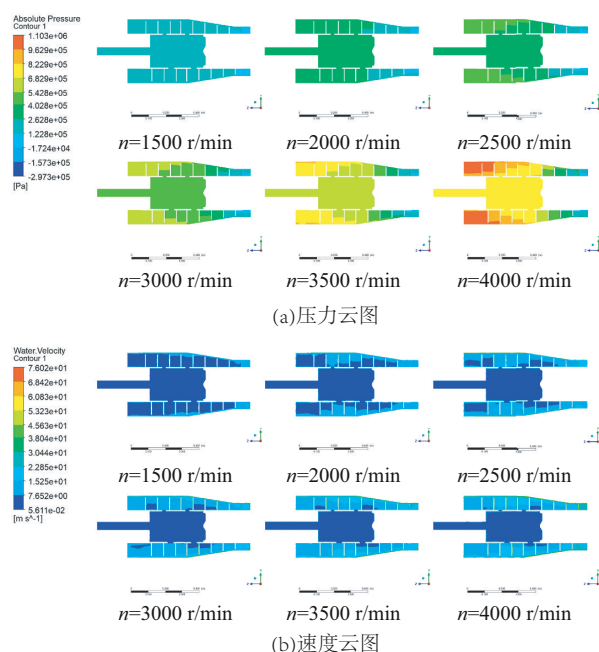


图5 不同转速下X=0截面处离心机内部流场分布云图

Fig.5 Flow field distribution contour in the X=0 section of the centrifuge at different rotational speeds

压力值随着转速的增加而增加。这表明随着转速的增大,离心机内部的涡旋强度增强,内部耗能升高。高转速会导致更多的功率消耗,振动也会相应增加,降低设备的使用寿命。

在离心力的作用下,转鼓外侧的速度大于转鼓内侧的速度。转鼓转速由1500 r/min增长到4000 r/min,在 $Z=200$ mm截面处,速度值由22.90 m/s增长到61.60 m/s;在 $Z=400$ mm截面处,速度值由13.10 m/s增长到32.80 m/s。流场内的速度沿着半径方向逐渐增大。随着离心机转速的增加,离心运动加剧,离心机内的颗粒会获得更高的圆周速度,加速颗粒的沉降,有利于流场内液体与固体的分离^[18]。同时,颗粒速度的增加,会产生更大的冲击力,加强对壁面的损伤。

图6显示了离心机部件的冲蚀率随转速的变化情况。当转速为1500 r/min时,转鼓和螺旋输送器的最大冲蚀率分别为 1.85×10^{-3} kg/(m²·s)和 2.03×10^{-2} kg/(m²·s);当转速增加到4000 r/min时,两者的冲蚀率分别增加到 2.59×10^{-2} kg/(m²·s)和 7.75×10^{-2} kg/(m²·s)。将散点拟合曲线,发现转速的增加使得离心机部件的冲蚀速率呈现上升趋势。这是因为随着转速的增加,液相流速逐渐提升,颗粒自身动能增强,在高速运动下对材料冲击作用越

大,撞击壁面会造成更大的能量损失^[19-20]。

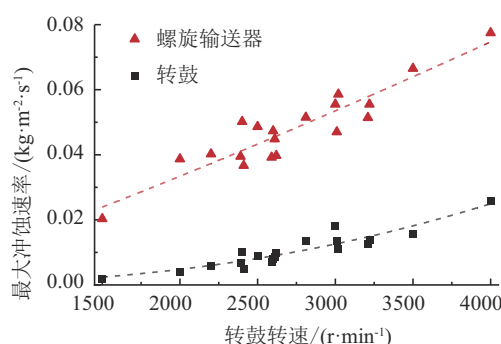


图6 离心机部件的冲蚀率随转速的变化

Fig.6 Variation of erosion rate of centrifuge components with rotational speed

图7展示了离心机部件在不同转速下的冲蚀轮廓。在离心力的作用下,大量颗粒从进料孔进入流道,伴随外液层高速转动,颗粒在叶片表面切削滑动,造成进料腔附近螺旋叶片的冲蚀磨损^[21]。随着转速的增加,颗粒对壁面冲击速度大大上升,螺旋叶片的冲蚀程度相应加剧。随后,颗粒沉降后在锥体表面聚集,并从沉淀出口处甩出。随着转速的增加,离心运动加剧,颗粒对壁面会产生更大的冲击力,转鼓的冲蚀程度逐渐加剧,冲蚀范围由沉淀出口扩展至整个转鼓锥体部分。

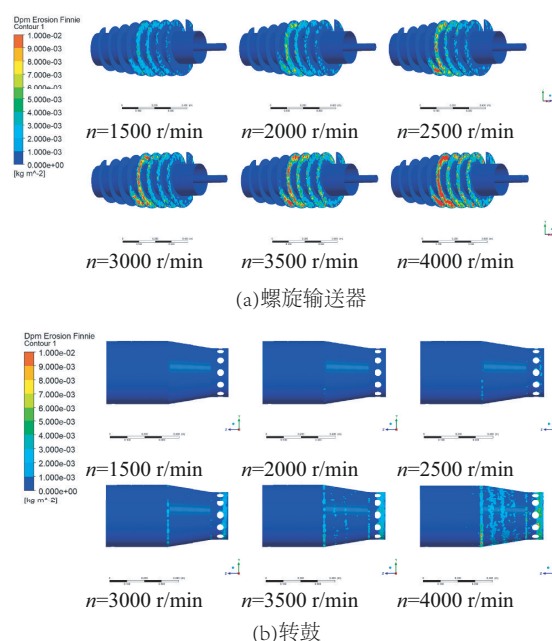


图7 离心机部件随转速变化的冲蚀云图

Fig.7 Erosion contours of centrifuge components at different rotational speeds

3.2 颗粒浓度对冲蚀磨损的影响

颗粒浓度一般是指钻井液中水不溶物的全部含量,通常用质量或体积百分比(%)表示,包括加重物、黏土、钻屑及可溶性盐等。考虑到颗粒浓度的影响,在转速为 3000 r/min、差转速为 20 r/min、颗粒浓度为 4%~14% 的条件下探究了离心机部件的冲蚀行为。

图 8、图 9 显示了不同浓度下离心机不同截面的流场分布。颗粒浓度从 4% 增长到 14%,在 $Z=200$ mm 和 $Z=400$ mm 截面处,转鼓流道的压力和速度基本保持不变,这表明浓度的改变对固体和液体的分离几乎没有影响。

图 10 显示了离心机部件的冲蚀率随颗粒浓度的变化情况。当颗粒浓度为 1% 时,转鼓和螺旋输送器的最大冲蚀率均为 1.98×10^{-3} kg/(m²·s);当颗粒浓度增加到 15%,两者的冲蚀率分别增加到 2.23×10^{-2} kg/(m²·s) 和 9.28×10^{-2} kg/(m²·s)。将散点拟合成曲线,看到随颗粒浓度增加,离心机部件的冲蚀率呈线性增长趋势。原因是随颗粒浓度升高,流体中颗粒数量增加,颗粒与壁面的撞击和反弹次数增多,加快了离心机部件的冲蚀速率^[22-23]。

图 11 描述了不同颗粒浓度下螺旋输送器和转鼓的冲蚀轮廓。螺旋输送机的柱端叶片被大量冲蚀,损伤最严重的部位是中心叶片。随着颗粒浓度逐渐上升,颗粒碰撞反弹螺旋叶片的次数会增多,叶片的冲蚀程度逐渐加深,冲蚀范围由中间叶片向末端叶片逐渐扩展^[24]。

转鼓的冲蚀区域主要集中在沉淀出口和转鼓锥体部分。随着颗粒浓度的升高,更多的颗粒被旋转沉降并迁移至转鼓锥部,导致转鼓锥体部分的颗粒体积分数增高,转鼓的冲蚀程度加深,冲蚀范围由沉淀出口和转鼓的锥角扩展到整个转鼓锥体内壁^[25]。

3.3 介质黏度对冲蚀磨损的影响

黏度是钻井液的一个重要参数,反映了钻井液内部流动阻力,直接影响钻井速度。考虑到介质黏度影响,在转速为 3000 r/min、差速为 20 r/min、固相含量为 10%、介质黏度为 0.001~0.011 Pa·s 的条件下,研究了离心机的内部流场及部件磨损行为。

图 12、图 13 显示了不同介质黏度下离心机不同截面的流场变化。介质黏度与流场压力的变化呈正相关。介质黏度由 0.001 Pa·s 增长到 0.011 Pa·s,

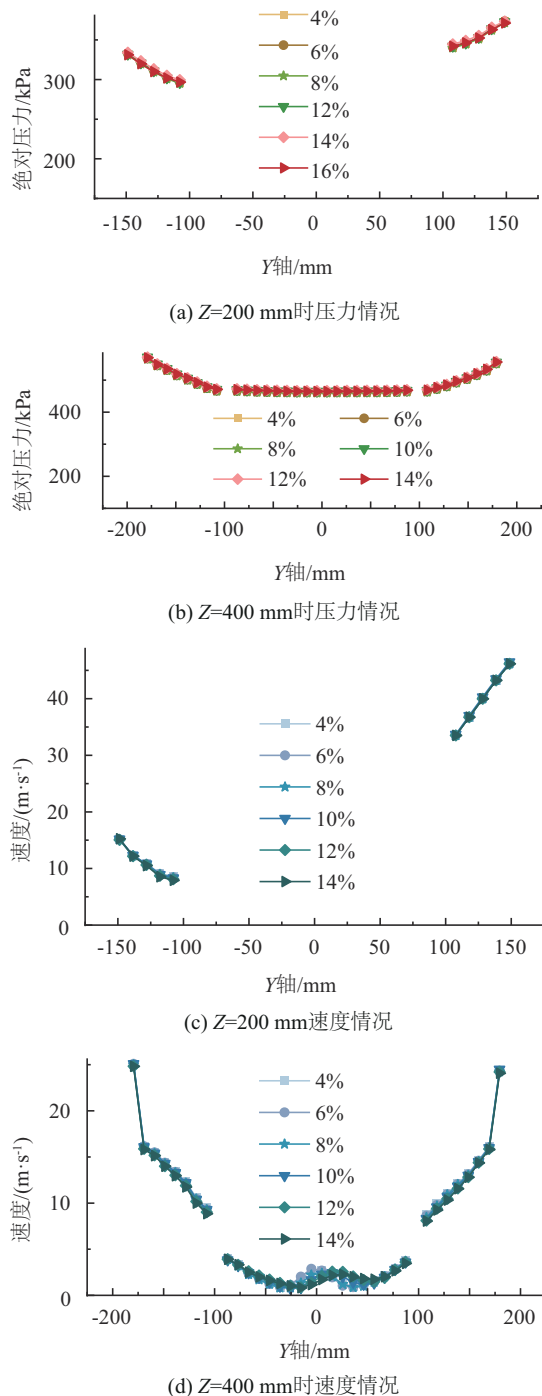


图 8 不同浓度下离心机内部不同径向截面的流场曲线

Fig.8 Flow field curves of different sections of the centrifuge at various particle concentrations

在 $Z=200$ mm 截面处,最大压力值由 334 kPa 增长到 419 kPa,最小压力值由 299 kPa 增长至 365 kPa;在 $Z=400$ mm 截面处,最大压力值由 571 kPa 增长到 746 kPa,最小压力值由 466 kPa 增长至 596 kPa。随着介质黏度升高,颗粒之间以及颗粒与流体之间

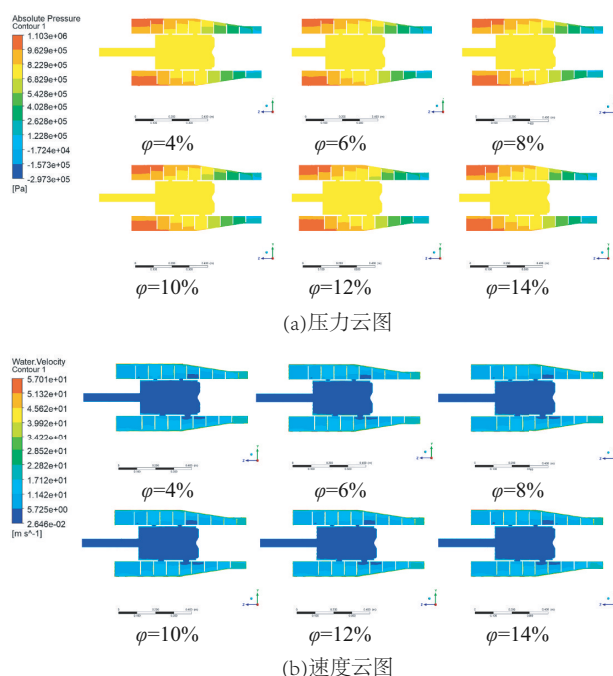
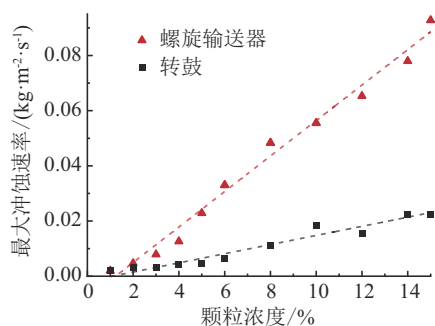
图9 不同颗粒浓度下离心机 $X=0$ 截面的流场分布Fig.9 Flow field distribution in the $X=0$ section of the centrifuge for different particle concentrations

图10 离心机部件的冲蚀率随颗粒浓度的变化

Fig.10 Variation of erosion rate of centrifuge components with particle concentration

的相互作用将增大,导致钻井液内流动阻力上升,离心机内的压力值逐渐增大。

介质黏度由 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增长到 $0.011 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,在 $Z=200 \text{ mm}$ 截面处,最大速度值由 46.15 m/s 增长到 46.16 m/s ,最小速度值由 15.17 m/s 增长到 17.72 m/s 。在 $Z=400 \text{ mm}$ 截面处,最大速度值由 24.88 m/s 增长到 28.80 m/s ,最小速度由 0.81 m/s 增长至 1.10 m/s 。黏度的上升会导致物料内聚力增强,流体速度略微上升。此外,由于流体阻力的增大,颗粒更易伴随流体运动,会有更多颗粒没有充分沉降就伴随溢流流出,导致分离后的液相含固率上升。

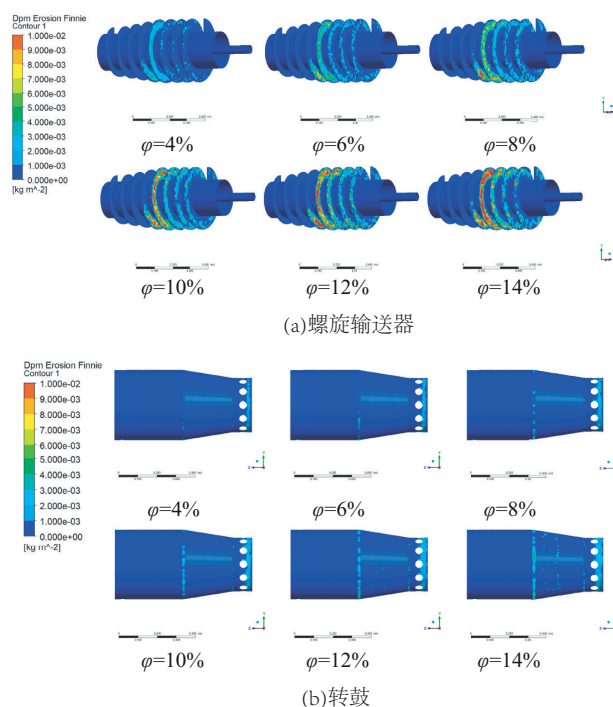


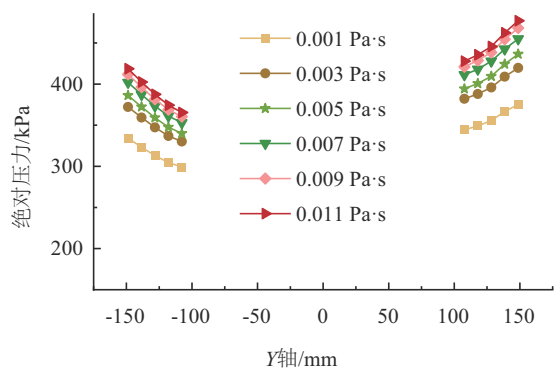
图11 不同颗粒浓度下的离心机部件的冲蚀云图

Fig.11 Erosion contours of centrifuge components at different particle concentrations

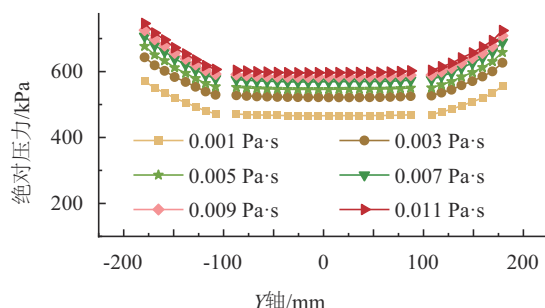
图14显示了离心机部件的冲蚀速率与介质黏度的关系。介质黏度由 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增长到 $0.011 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,转鼓的最大冲蚀速率由 $1.09 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 降低到 $2.42 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。将散点拟合成曲线,发现随着介质黏度的增加,转鼓的冲蚀率降低。介质黏度的升高会导致钻井液流动性降低,颗粒之间以及颗粒与流体之间的相互作用将增大。在沉降过程中颗粒很难从液体中分离出来到达转鼓壁,固体颗粒与转鼓壁接触减少,转鼓的冲蚀速率降低^[26]。

介质黏度由 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增长到 $0.011 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,螺旋输送器的最大冲蚀速率由 $5.58 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增长到 $2.33 \times 10^{-1} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。将散点拟合成曲线,发现黏度水平的升高使得螺旋输送器的冲蚀速率上升。这一现象可归因于介质黏度的增加使得流体对颗粒产生了更大的阻力。由于阻力的存在,钻井液内部颗粒内聚力上升,颗粒更易伴随流体并跟随螺旋输送机转动,增加了颗粒与螺旋壁之间的接触频率,因此螺旋输送器的冲蚀速率上升^[27]。

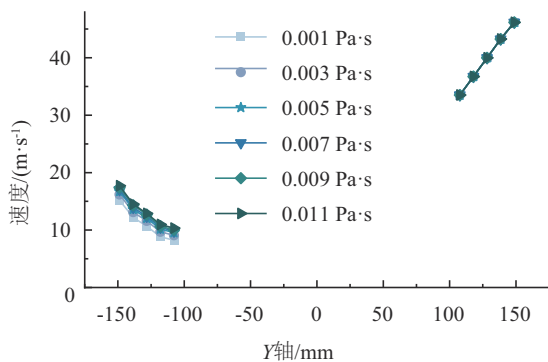
图15显示了不同介质黏度下离心机各部件的冲蚀轮廓图。螺旋叶片的磨损主要是由螺旋输送固相颗粒,长时间连续碰撞进料孔附近螺旋叶片推



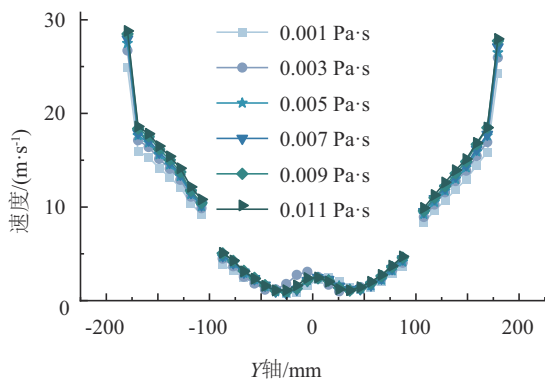
(a) Z=200 mm时压力情况



(b) Z=400 mm时压力情况



(c) Z=200 mm速度情况



(d) Z=400 mm时速度情况

图 12 不同介质黏度下不同径向截面的流场分布曲线

Fig.12 Flow field curves of different sections of the centrifuge at various medium viscosities

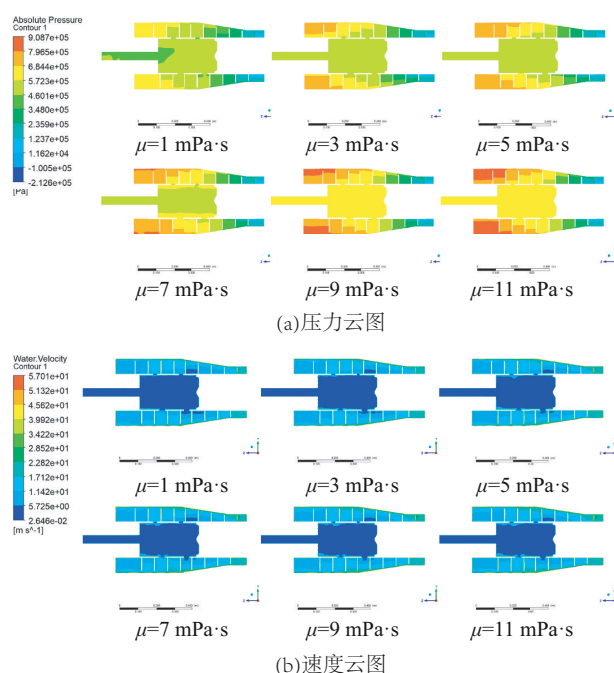


图 13 不同介质黏度下的 X=0 截面处的流场分布云图

Fig.13 Flow field distribution at X=0 for different medium viscosities

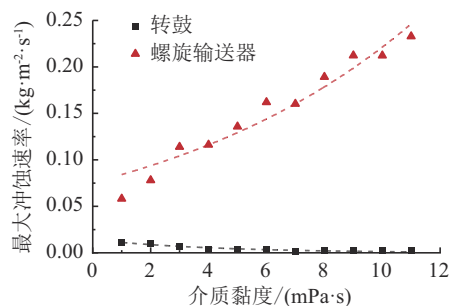


图 14 离心机部件的冲蚀率随介质黏度的变化曲线

Fig.14 Variation curve of erosion rate of centrifuge components with medium viscosity

力面造成。随着黏度的上升,颗粒难以从流体中沉降,悬浮液在转鼓流道内跟随螺旋转动,增加了颗粒与螺旋壁之间的接触,冲蚀程度由两端叶片向中间螺旋叶片逐渐加深,冲蚀范围由柱端叶片向锥段叶片扩展。此外,介质黏度的增加使得钻井液对固体颗粒的阻力逐渐上升,颗粒难以从流体中分离、沉降、到达转鼓壁,转鼓壁的冲蚀程度和冲蚀面积均逐渐减小。

4 结论

为全面研究离心机的冲蚀磨损性能,基于密集

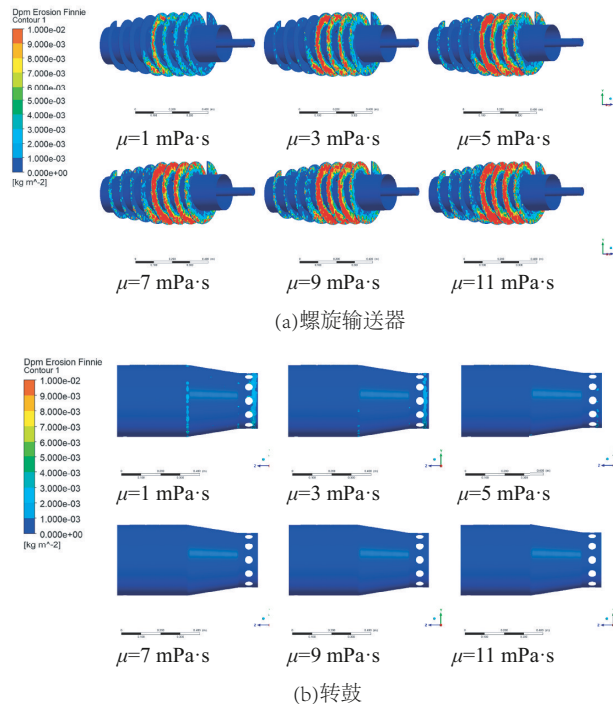


图15 不同介质黏度下离心机部件的冲蚀云图

Fig.15 Erosion contours of centrifuge components for different medium viscosities

离散相模型建立了一种可预测关键部件磨损行为的数值模拟方法。分析了离心机关键旋转部件的冲蚀情况,探究了不同转速、颗粒浓度及介质黏度对关键部件冲蚀的影响。研究结果如下:

(1)基于稠密离散相(DDPM)模型构建了预测关键旋转部件固液分离和冲蚀磨损性能的数值模型。通过分析,得到螺旋输送器的冲蚀区域集中于进料腔附近的螺旋叶片处。此外,转鼓的沉淀出口及锥体内壁也受到较为严重的冲蚀。

(2)随着转速的增加,流场速度逐渐增大,对壁面冲击作用增强,壁面最大冲蚀速率升高。高转速会导致更多的功率消耗,振动也会相应增加,降低设备的使用寿命。在实际使用过程中,有必要在离心机运行期间适当控制转速,以防止离心机部件遭到冲蚀损坏。

(3)离心机部件的冲蚀率与颗粒浓度呈正相关。随着颗粒浓度升高,会有更多数量的颗粒进入旋转部件,颗粒对壁面碰撞反弹频率增高,部件冲蚀磨损加剧。建议在现场进行固液分离时应尽量减少高浓度固体进入离心机,以减少冲蚀。

(4)介质黏度的升高会导致颗粒之间以及颗粒

与流体之间的相互作用增大,钻井液流动阻力上升,离心机内的流体速度略微增加,压力值逐渐增大。随着介质黏度的升高,内部颗粒更易伴随流体并跟随螺旋输送器转动,难以沉降、分离、到达转鼓壁,使得螺旋输送器冲蚀速率上升,而转鼓的冲蚀速率下降。

研究结果对迭代升级关键结构与动力学参数优化设计、表面延寿防护以及现场使用操作具有一定指导意义。

参考文献(References):

- [1] 冯美贵,蒋睿,徐军军,等. 泥浆不落地技术在地质岩芯钻探中的应用[J]. 地质论评, 2023, 69 (S1): 518-520.
FENG Meigui, JIANG Rui, XU Junjun, et al. Application of mud-less technique in geological core drilling[J]. Geological Review, 2023, 69 (S1): 518-520.
- [2] 冯美贵,朱迪斯,翁炜,等. 小口径地质钻探用 TGLW220×660 型冲洗液离心机的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41 (12): 40-43.
FENG Meigui, ZHU Disi, WENG Wei, et al. Development of TGLW220 ×660 Flushing Fluid Centrifuge for the Small-diameter Geological Drilling[J]. Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling Engineering), 2014, 41 (12): 40-43.
- [3] 冯美贵,朱迪斯,翁炜,等. TGLW220×660 型冲洗液离心机转鼓的强度分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41 (03): 41-43.
FENG Meigui, ZHU Disi, WENG Wei, et al. Analysis on the Strength of TGLW220 ×660 Flushing Fluid Centrifuge Drum [J]. Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling Engineering), 2014, 41 (03): 41-43.
- [4] 冯美贵,王健策,高元宏,等. 地质岩芯钻探钻井液固相控制技术现场应用[J]. 西部探矿工程, 2022, 34 (02): 100-104.
FENG Meigui, WANG Jianze, GAO Yuanhong, et al. Field application of solid phase control technology for geological core drilling[J]. Western Exploration Engineering, 2022, 34 (02): 100-104.
- [5] 冯美贵,刘启栋,郭伟,等. 钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究[J]. 钻探工程, 2024, 51 (03): 118-124.
FENG Meigui, LIU Qidong, GUO Wei, et al. Research on the prevention of scaling on the inner wall of the wire-line drill rod by drilling fluid centrifuge [J]. Drilling Engineering, 2024, 51 (03): 118-124.
- [6] 温得全,冯美贵,李斌,等. 智能高效小型一体化泥浆不落地系统的研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49 (04): 49-54.
WEN Dequan, FENG Meigui, LI Bin, et al. Research and application of the intelligent and efficient small-size integrated mud non-landing system [J]. Drilling Engineering, 2022, 49 (04): 49-54.
- [7] 蒋睿,赵志涛,朱迪斯,等. 螺旋输送器动平衡精度影响因素分析及工艺优化[J]. 钻探工程, 2023, 50 (01): 61-68.
JIANG Rui, ZHAO Zhitao, ZHU Di, et al. Analysis of influ-

- encing factors on and optimization of the dynamic balancing process of the horizontal centrifuge spiral conveyor[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50 (01): 61-68.
- [8] 冯美贵, 朱迪斯, 翁炜, 等. 钻井液离心机存在的问题及解决措施[J]. *地质装备*, 2018, 19 (02): 10-12.
- FENG Meigui, ZHU Di, WENG Wei, et al. Problems and solution measures of drilling fluid centrifuge[J]. *Geological Equipment*, 2018, 19 (02): 10-12.
- [9] Pouraria H, Darihak F, Park K H, et al. CFD modeling of the influence of particle loading on erosion using dense discrete particle model[J]. *Wear*, 2020, 460: 203450.
- [10] 董连东, 袁惠新, 付双成, 等. 湍流模型在卧螺离心机内单相流场数值模拟中的适用性分析[J]. *流体机械*, 2013, 41 (10): 25-29.
- DONG Liandong, YUAN Huixin, FU Shuangcheng, et al. Analysis on the Applicability of Turbulence Models for the Numerical Simulation of the Flow Field in a Decanter Centrifuge [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41 (10): 25-29.
- [11] Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion[J]. *Wear*, 1995, 186: 1-10.
- [12] Poursaeidi E, Tafrih H, Amani H. Experimental-numerical investigation for predicting erosion in the first stage of an axial compressor[J]. *Powder Technology*, 2017, 306: 80-87.
- [13] Zhang Y, Yang M, Jiang L, et al. High concentration fine particle separation performance in hydrocyclones [J]. *Minerals*, 2021, 11(3): 307.
- [14] Zhang L, Fan J, Zhang P, et al. Effect of local erosion on the flow field and separation performance of the cyclone separator [J]. *Powder Technology*, 2023, 413: 118007.
- [15] 李一岚. 流变性对钻井液离心机内流特性及分离机理影响研究[D]. 西南石油大学, 2017.
- LI Yilan. Research on the influence of rheology on the internal flow characteristics and separation mechanism of drilling fluid centrifuge[D]. Southwest Petroleum University, 2017.
- [16] 朱明军. 可调溢流结构三相卧螺离心机油水砂分离性能研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- ZHU Mingjun. Research on oil-water-sand separation performance of three-phase decanter centrifuge with adjustable overflow structure[D]. Dalian University of Technology, 2022.
- [17] 董连东, 付双成, 袁惠新. 卧螺离心机内压力场的数值模拟[J]. *化工进展*, 2014, 33 (02): 309-313+336.
- DONG Liandong, FU Shuangcheng, YUAN Huixin. Numerical simulation on pressure field in a decanter centrifuge [J]. *Chemical Progress*, 2014, 33 (02): 309-313+336.
- [18] 何石. 超深井钻井液离心机分析与应用研究[D]. 西南石油大学, 2014.
- HE Shi. Research on analysis and application of centrifuge for drilling fluid in ultra-deep wells[D]. Southwest Petroleum University, 2014.
- [19] Li C, Bin G, Li J, et al. Erosion wear characteristics of the aero-compressor blades in full speed range [J]. *Powder Technology*, 2023, 418: 118227.
- [20] Zhang L, Guang F B, Zhong X L, et al. Study on carbon particle deposition distribution of turbocharger turbine blade based on the gas-solid two-phase flow theory [J]. *Tribology International*, 2023, 178: 108019.
- [21] Li C, Bin G, Li J, et al. Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model [J]. *Tribology International*, 2021, 163: 107197.
- [22] 王凯, 柳涵宇, 王李科, 等. 颗粒体积浓度对半开式叶轮离心泵泄漏涡和磨损的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39 (16): 44-53.
- WANG Kai, LIU Hanyu, WANG Like, et al. Effect of particle volume concentration on leakage vortex and wear of semi-open impeller centrifugal pump [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2023, 39 (16): 44-53.
- [23] 莫丽, 许先雨, 刘栖, 等. 钻井液固液分离旋流器壁面磨损特性[J]. *润滑与密封*, 2023, 48 (02): 44-51.
- MO Li, XU Xianyu, LIU Qi, et al. Wall Wear Characteristics of Hydrocyclone for Solid-liquid Separation of Drilling Fluid [J]. *Lubrication and Sealing*, 2023, 48 (02): 44-51.
- [24] Azimia M, Bart H J. Computational analysis of erosion in a radial inflow steam turbine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 64: 26-43.
- [25] 钟林, 冯桂弘, 张计春, 等. 基于CFD数值模拟的排污阀冲蚀磨损影响规律[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39 (02): 151-157.
- ZHONG Lin, FENG Guihong, ZHANG Keichun, et al. Influence law of erosion wear of blowdown valve based on CFD numerical simulation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering*, 2021, 39 (02): 151-157.
- [26] Li Q, Guan Z, Xu Y, et al. Research on the Erosion Resistance of High-Pressure Liquid-Solid Two-Phase Flow Junction Drilling Spool [J]. *Journal of Failure Analysis Prevention*, 2023, 23(5): 2244-2259.
- [27] 袁惠新, 张衍, 吕凤霞, 等. 物性参数对旋流器壁面磨损的数值模拟研究[J]. *食品工业*, 2017, 38 (04): 233-237.
- YUAN Huixin, ZHANG Yan, LV Fengxia, et al. Numerical Simulation Research on Influence of Medium Physical Parameters on Cyclone Wall Attrition [J]. *Food Industry*, 2017, 38 (04): 233-237.

(编辑 王跃伟)