



钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律

郭龙辉 程桦 姚直书 荣传新 林键 王宗金

引用本文：

郭龙辉, 程桦, 姚直书, 等. 钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 45–59.

GUO Longhui, CHENG Hua, YAO Zhishu. Pressure distribution and fluid migration law of gas lift reverse circulation well washing flow field in drilling sinking[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 45–59.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1657>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤与瓦斯突出流体多物理参数动态响应试验研究

Experimental study on dynamic response of coal and gas outburst fluid with multiple physical parameters

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 159–168 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/55f1d3b7-b25a-47aa-ba38-253dbac3f024>

煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展

Research progress on the two-phase flow migration law of coal and gas outburst

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1826>

孔隙型含水岩层钻井法凿井壁后充填技术研究

Research on backfill technology of drilling shaft sinking method in porous water-bearing rock stratum

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 1–9 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d3ea4292-bc7d-4e0e-94b8-2ff523e35c55>

煤层气井多相流条件下不同粒径煤粉启动 – 运移规律

Start-migration law of coal powder with different particle sizes under multi-phase flow conditions in coalbed methane wells

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/da890537-828a-4668-86c6-3d477f769c74>

多层叠置含气系统煤层气合采储层流体动态响应特征

Fluid dynamic response characteristics of CBM coproduction reservoir in MSGBS

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 30–37. <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/112b61f3-51d3-4a0b-a07d-0eb26b17e1fb>

天然气储层裂隙中气液两相流的流态转变条件数学模型

Mathematical model for flow regime transition conditions of gas-liquid two-phase flow in natural gas reservoir fracture

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 155–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1054>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭龙辉,程桦,姚直书,等.钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律[J].煤炭科学技术,2025,53(10):45-59.
GUO Longhui, CHENG Hua, YAO Zhishu, et al. Pressure distribution and fluid migration law of gas lift reverse circulation well washing flow field in drilling sinking[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 45-59.

钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律

郭龙辉^{1,2},程桦^{2,3,4},姚直书²,荣传新²,林键^{2,3},王宗金⁵

(1.洛阳理工学院 智能建造与土木工程学院,河南洛阳 471000;2.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽淮南 232001;3.安徽建筑大学 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室,安徽合肥 230601;4.安徽大学 资源与环境工程学院,安徽合肥 230601;5.中煤特殊凿井有限责任公司,安徽合肥 230001)

摘要:为了揭示钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律,以陶忽图煤矿北风井 $\varnothing 5$ m超前钻井为研究背景,基于流体力学相关理论,建立了气举反循环洗井流场的压力数学模型,并给出了钻杆环空、井底和钻杆内部流体压力的理论解析解,其次,采用CFD-DEM方法(计算流体力学与离散单元法耦合),建立了气举反循环多相耦合洗井的数值模型,验证了洗井流场压力模型的正确性,获取了洗井流场流体的运移规律,最后,基于洗井流场的压力数学模型及理论解析解,探究了含气率、泥浆密度、泥浆黏度、岩渣密度和含渣率等因素对洗井流场压力的影响规律。结果表明:截锥型钻头水平井底流体的平均径向流速>切向流速>轴向流速;岩渣在井底做“螺旋状下滑—井底积聚—推动和悬浮—吸附和举升”的动态循环运移,在钻杆内液固及液固气段分别以“低流速,高密度”和“高流速,低密度”形式运移。钻杆内流体压力沿井口方向近似呈线性降低趋势,在注气端处,流体压力骤降,钻杆内外压差达到最大;井底流体压力自外向内呈“先小幅降低,后大幅降低”趋势,在井底有效吸附区流体压力降低幅度及速率更大。含气率、泥浆密度与钻杆内外流体压差呈正相关关系,泥浆黏度、岩渣密度、液固及液固气段含渣率则与之呈负相关关系,各因素对钻杆内外流体压差的敏感性可归结为:泥浆密度>含气率>岩渣密度>泥浆黏度>液固段含渣率>液固气段含渣率。研究可为破解侏罗系地层钻井法凿井气举反循环洗井效率低下技术难题,提供有益理论参考。

关键词:钻井法凿井;气举反循环;洗井流场;压力分布;流体运移

中图分类号:TD265 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)10-0045-15

Pressure distribution and fluid migration law of gas lift reverse circulation well washing flow field in drilling sinking

GUO Longhui^{1,2}, CHENG Hua^{2,3,4}, YAO Zhishu², RONG Chuanxin², LIN Jian^{2,3}, WANG Zongjin⁵

(1. School of Intelligent Construction and Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Building Structure and Underground Engineering Anhui Provincial Key Laboratory, Anhui JianZhu University, Hefei 230601, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 5. China Coal Special Drilling Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: In order to reveal the pressure distribution and fluid migration law of the gas lift reverse circulation washing flow field in drilling method, the $\varnothing 5$ m advanced drilling of the north wind well in Taohutu coal mine was taken as the research background. Based on the relevant theories of fluid mechanics, a pressure mathematical model of the gas lift reverse circulation washing flow field was estab-

收稿日期:2024-11-14 策划编辑:朱恩光 责任编辑:赵雪君 DOI: 10.12438/cst.2024-1657

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174104);国家自然科学基金青年基金资助项目(52304073);安徽省重点研发计划资助项目(202004a07020034)

作者简介:郭龙辉(1995—),男,河南洛阳人,讲师,博士。E-mail: guolonghui7864@163.com

通讯作者:程桦(1956—),男,安徽合肥人,教授,博士生导师。E-mail: hcheng@aust.edu.cn

lished, and the theoretical analytical solutions of the fluid pressure in the drill pipe annulus, bottom hole and inside the drill pipe were given. Secondly, the CFD-DEM method (coupling computational fluid dynamics and discrete element method) was used to establish a numerical model of gas lift reverse circulation multiphase coupling well cleaning, verifying the correctness of the pressure model of the well cleaning flow field and obtaining the migration law of the fluid in the well cleaning flow field. Finally, based on the pressure mathematical model and theoretical analytical solution of the well cleaning flow field, the influence of factors such as gas content, mud density, mud viscosity, rock slag density, and slag content on the pressure of the well cleaning flow field was explored. The results indicate that: The average radial flow velocity of the horizontal bottom hole fluid of the truncated cone drill bit is greater than the tangential flow velocity and the axial flow velocity; Rock debris undergoes dynamic cyclic transport at the bottom of the well, including spiral downward movement, accumulation at the bottom of the well, propulsion and suspension, adsorption and lifting. It is transported in the form of “low flow rate, high density” and “high flow rate, low density” in the liquid-solid and liquid-solid gas sections inside the drill pipe, respectively. The fluid pressure inside the drill pipe decreases approximately linearly along the wellhead direction. At the gas injection end, the fluid pressure drops sharply, and the pressure difference inside and outside the drill pipe reaches its maximum; The fluid pressure at the bottom of the well shows a trend of “first slightly decreasing, then significantly decreasing” from the outside to the inside, with a greater decrease in fluid pressure and rate in the effective adsorption zone at the bottom of the well. The gas content, mud density, and fluid pressure difference inside and outside the drill pipe are positively correlated, while mud viscosity, rock slag density, liquid-solid and liquid-solid gas section slag content are negatively correlated. The sensitivity of various factors to the fluid pressure difference inside and outside the drill pipe can be summarized as follows: mud density>gas content>rock slag density>mud viscosity>liquid-solid section slag content>liquid-solid gas section slag content. The research results can provide useful theoretical references for solving the technical problem of low efficiency of gas lift reverse circulation well washing in Jurassic strata drilling method.

Key words: drilling shaft sinking; gas lift reverse circulation; well washing flow field; pressure distribution; fluid migration

0 引言

2023年我国原煤产量约47.1亿t,同比2022年增长3.4%,其中山西、陕西、内蒙古、新疆4省(区)占全国的81.3%,我国煤炭资源开发已向西部转移^[1-4]。目前,西部新(拟)建矿井数量占全国的87%,新井建设常采用冻结法施工,2023年,陕西延长石油西部矿区可可盖煤矿首次采用并成功实施了钻井法施工进、回风立井,证明了钻井法施工西部含水弱胶结白垩—侏罗系地层深大立井井筒是可行的^[5-6]。钻井法是矿山立井井筒穿越深厚含水不稳定地层的一种机械化、自动化凿井方法,其施工内容主要包括竖井钻机机械破岩,循环泥浆洗井排渣,地面预制钻井井壁,泥浆悬浮下沉井壁,壁后充填固井等^[7-9]。与冻结法相比,钻井法具有机械化程度高、钻进自动控制、井下无人的优势,符合少人、安全、绿色、智能化的煤炭行业发展趋势,截至2024年,采用钻井法已成功钻凿121个井筒(中东部矿区119个,西部矿区2个),总深度超过23km^[10-12]。工程实践表明,在钻凿至侏罗系泥质砂岩地层时,常出现刀具磨损严重、岩渣排出困难、洗井效率低下等工程问题,从而直接影响钻进效率,初步分析,对现行液—固—气多相耦合洗井流场压力分布及流体运移规律缺乏认识,气举反循环排渣速度不能满足高效成井的需求,是导致钻进和排渣效率低的主要原因之一,亟待研究

解决。

国内外相关领域学者,针对洗井流场的压力分布及流体的运移规律等问题,开展了大量研究,取得了系列成果。在洗井流场的压力数学模型及分布规律方面,张智等^[13]建立了考虑流体性质非线性变化的深水油气井环空压力预测模型,预测了不同工况下的环空温度与压力,确定了环空压力安全预警值;刘平江等^[14]建立了超深井温压耦合条件下井筒环空压力计算模型,发现超深井温度对流体的密度、动切力、流性指数和稠度系数等流变参数有重要影响,且影响敏感性大于压力;王小兵等^[15]研究了不同洗井液对油井井筒的压力分布规律,发现沿井深方向井筒内的压力近似呈线性增加,泡沫流体相较于水能在井底形成更小的液柱压力,更适用低压力系数油井的洗井作业;WANG等^[16]建立了考虑热源的超深井筒返液流动模型,研究了排量、油管尺寸等因素对井筒压力分布的影响,发现井筒压力和温度都是从井底到井口递减的。现有洗井流场的压力模型都集中于超深油气井,且研究重点都在钻杆环空压力和温度的计算上,因此,此类压力模型和压力分布规律与煤矿立井气举反循环洗井不相适应。

在洗井流场流体运移规律方面,付孟雄等^[17]采用理论分析和数值模拟相结合的方式研究了巷道底板锚固孔正循环排渣钻渣的运移规律,发现孔底钻渣呈上下螺旋往复运动,孔底外围钻渣呈先减速后

类匀速的运动状态; 范宇等^[18]通过数值模拟研究了页岩气水平井钻井过程中岩屑的运移规律, 发现提高钻杆转速可有效抑制岩屑颗粒的沉积趋势, 降低岩屑床厚度, 增强岩屑的悬浮程度; 姚建林^[19]基于气体钻井技术, 研究了油气井钻凿时环空气体的流动规律和岩屑的运移轨迹; YANG 等^[20]通过数值模拟方式研究了喷嘴数量、喷嘴角度、钻杆转速等因素对水平井洗井流场中岩渣输送的影响。以上学者的研究多集中于油气井和巷道底板锚固孔洗井流场流体的运移规律, 其钻孔直径、洗井方式、洗井介质和流动形态均与煤矿立井气举反循环洗井有较大差异, 因此相关成果不能满足需要。

综上, 以西部矿区陶忽图煤矿北风井 $\varnothing 5\text{ m}$ 超前钻井为研究背景, 建立气举反循环洗井流场的压力数学模型和多相耦合洗井的数值模型, 通过理论计算和数值模拟相结合的方式研究钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律, 对明晰液-固-气多相耦合洗井流场分布规律及提高洗井、钻井效率有重要意义。

1 工程概况

陶忽图煤矿位于鄂尔多斯市境内, 矿井设计生产能力 8 Mt/a , 其北风井井筒设计深度 751 m , 净直径 6.5 m , 井筒依次下穿第四系、白垩系、侏罗系。陶忽图北风井采用钻井法施工, 钻进荒径为 9.4 m , 钻进方式采用最新研发的 ZMD120/1200 型竖井钻机(图 1)进行 $\varnothing 5.0\text{ m}$ 超前钻进和 $\varnothing 9.4\text{ m}$ 扩孔钻进联合的两级钻进施工, 其中超前钻孔采用直径为 5 m 的截锥型滚刀钻头, 钻头截锥度为 35° , 洗井方式采用气举反循环泥浆悬浮排渣方式。陶忽图北风井是我

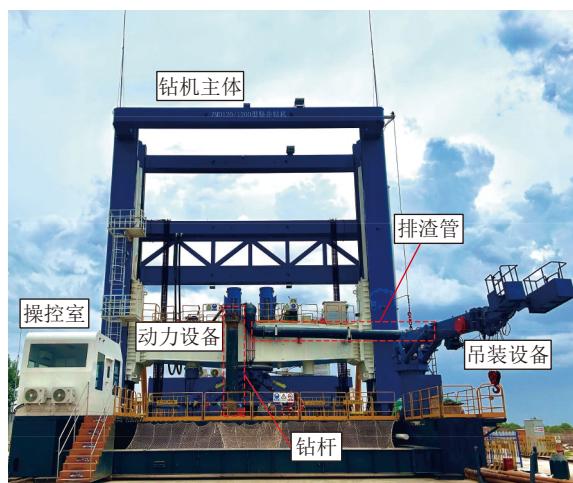


图 1 ZMD120/1200 型竖井钻机

Fig.1 ZMD120/1200 shaft drilling rig

国现有煤矿立井采用钻井法施工中“深度最深, 直径最大”的立井井筒, 也是继可可盖煤矿中央进、回风井之后, 钻井法凿井在我国西部矿区的再一次实践。

2 气举反循环洗井压力模型

2.1 洗井压力模型及模型假定

气举反循环洗井过程包括钻杆外部循环泥浆流的流动, 井底岩渣的清洁和钻杆内部多相流体的输送, 为了揭示钻井法凿井气举反循环洗井流场压力的分布规律, 结合气举反循环洗井施工工艺, 建立了洗井流场的压力模型(图 2), 其中, 压力模型包括钻杆外部环空流场、钻杆内部流场和井底流场的压力模型, 模型假定如下所示:

- 1) 各相间不发生相互作用, 且在钻杆内均匀分布;
- 2) 各相均为不可压缩性流体, 且不考虑气相的膨胀性;
- 3) 洗井模型为绝热系统, 不与外界发生热量交换。

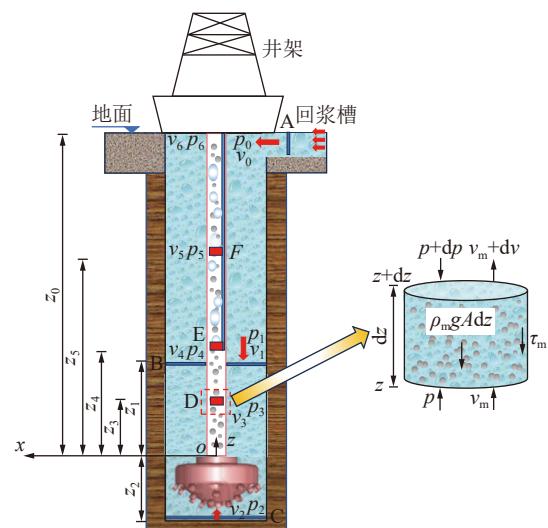


图 2 洗井流场压力模型
Fig.2 Pressure model of well washing flow field

2.2 钻杆外部环空压力

根据图 2 中洗井流场的压力模型, 以钻杆入口为基准面, 建立地表回浆槽处和钻杆外部环空任意截面的伯努利方程^[21], 如式(1)所示:

$$z_0 + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 \quad (1)$$

其中, z_0 为回浆槽处任意截面位置的高程, m ; α_0 为回浆槽处泥浆动能修正系数; v_0 为回浆槽处泥浆的流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; z_1 为钻杆外部环空

任意截面位置的高程, m; p_1 为钻杆外部环空任意截面位置的压力, MPa; γ_1 为泥浆的容重, kN/m³; α_1 为钻杆环空处泥浆动能修正系数; v_1 为环空处泥浆的流速, m/s; h_1 为两截面之间的水头损失; 在一般工程计算中可取 $\alpha_0 = \alpha_1 \approx 1$ 。

其中,

$$h_1 = \lambda \frac{L v_1^2}{2gD} \quad (2)$$

式中: λ 为环空泥浆流动的沿程阻力系数, 由泥浆流动时的雷诺数来确定^[22]; L 为流动路径长度, m; D 为钻杆直径, m。

当泥浆循环量恒定时, 建立地表回浆槽处和钻杆外部环空任意截面的连续性方程, 进而可确定钻杆环空位置泥浆的流速:

$$v_0 A_0 = v_1 A_1 \quad (3)$$

式中: A_0 为回浆槽处泥浆流的横截面积, m²; A_1 为钻杆外部环空泥浆流的横截面积, m²。

将式(2)和式(3)代入式(1), 可求得钻杆外部环空泥浆压力:

$$p_1 = \gamma_1 \left[(z_0 - z_1) + \frac{\gamma_1 (v_0^2 - v_1^2)}{2g} - \lambda \frac{L v_1^2 \gamma_1}{2gD} \right] \quad (4)$$

2.3 井底流体压力

根据图2中洗井流场的压力模型, 以钻杆入口为基准面, 建立井底截面和钻杆入口处(此时元流的速度和压力分别为 v_3' , p_3')的伯努利方程, 如式(5)所示:

$$z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_{ls}} = z_3 + \frac{v_3'^2}{2g} + \frac{p_3'}{\gamma_{ls}} + h_2 \quad (5)$$

式中: z_2 为井底截面的高程, m; v_2 为井底流体速度, m/s; p_2 为井底流体压力, MPa; γ_{ls} 为泥浆-岩渣液固混合流的容重, kN/m³; z_3 为钻杆入口处的高程, m; v_3' 为钻杆入口处流体速度, m/s; p_3' 为钻杆入口处流体压力, MPa; h_2 为两截面间的沿程能量损失。

井底流体在钻头的转动作用和吸渣口的吸附作用下, 流动形式复杂多变, 主要包括切向流动、径向流动和轴向流动, 在多种流动共同作用下, 循环流体以螺旋流形式冲洗井底, 因此, 井底流体运动不是单一流动而是复杂的合成流动, 其流动速度如式(6)^[3]所示:

$$\begin{cases} v_t = 2\pi R_i w \delta / 60 \\ v_r = Q / (2\pi R_i h) \\ v_a = \alpha_h Q / (\pi R_i^2) \\ v_2 = K \sqrt{v_t^2 + v_r^2 + v_a^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_t 为井底流体的切向流速, m/s; R_i 为井底任意

半径, m; w 为钻头转速, r/min; δ 为经验常数; v_r 为井底流体的径向流速, m/s; Q 为泥浆循环量, m³/h; h 为井底净空高度, h; v_a 为井底流体的轴向流速, m/s; α_h 为井底垂直方向速度分布系数; K 为折减系数。

将式(6)代入式(7)后, 即可获得井底流体压力的表达式:

$$p_2 = \gamma_{ls} \left[(z_3 - z_2) + \frac{v_3'^2 - K^2 (v_t^2 + v_r^2 + v_a^2)}{2g} + \frac{p_3'}{\gamma_{ls}} + h_2 \right] \quad (7)$$

2.4 钻杆内部压力

在钻杆内部液固区段取一长度为 dz 的元流, 根据流体的动量定理可知, 该元流在流动过程中, 作用在该元流上各外力的合力矢量等于该元流的动量变化率^[21], 如图2所示, 该元流在运动过程中分别受到重力、压差力和壁面摩擦力的作用, 因此, 建立该元流流动的动量方程, 即:

$$-\rho_m g A dz + p A - (p + dp) A - \tau_m \pi D dz = \rho_m A dz \frac{dv_m}{dt} \quad (8)$$

式中: ρ_m 为泥浆和岩渣两相流的混合密度, kg/m³; A 为钻杆的净截面积, m²; p 为元流上方的压力, MPa; $p + dp$ 为元流下方的压力, MPa; τ_m 为两相流的壁面剪切应力, MPa; v_m 为两相流的平均流速, m/s。

将式(8)两侧同除以 $A dz$, 并进行化简, 即可获得钻杆内液固区段流体的压降梯度表达式:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_m g - \frac{\tau_m \pi D}{A} - \rho_m v_m \frac{dv_m}{dz} \quad (9)$$

由上式可以发现, 钻杆内液固区段的压降由重位压降、摩擦压降和加速压降3部分组成^[23], 其各部分的表达式如下所示。

$$\begin{cases} \frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_m + \left(\frac{dp}{dz} \right)_f + \left(\frac{dp}{dz} \right)_a \\ \left(\frac{dp}{dz} \right)_m = -\rho_m g \\ \left(\frac{dp}{dz} \right)_f = -\frac{\tau_m \pi D}{A} \\ \left(\frac{dp}{dz} \right)_a = -\rho_m v_m \frac{dv_m}{dz} \end{cases} \quad (10)$$

根据文献[21], 管壁上的摩擦应力与单位体积流体所具有的动能成正比, 因此,

$$\tau_m = \frac{\lambda_m \rho_m v_m^2}{4} \Rightarrow \left(\frac{dp}{dz} \right)_f = \frac{\tau_m \pi D}{A} = \lambda_m \frac{\rho_m v_m^2}{2D} \quad (11)$$

式中: λ_m 为液固区段两相流的沿程阻力系数。

在摩擦压降中, 两相流体的壁面摩阻系数 λ_m 不易确定, 因此, 在计算两相流体的摩擦压降时, 会引入两相摩擦压降倍数 ϕ_{10}^2 , 将两相流摩擦压降记为全

液相流动时的压降与两相摩擦压降倍数的乘积^[24], 即:

$$\begin{cases} \left(\frac{dp}{dz} \right)_f = - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f_{10}} \phi_{10}^2 = \lambda_l \frac{\rho_l v_l^2}{2D} \phi_{10}^2 \\ \phi_{10}^2 = \frac{\lambda_l}{\lambda_{10}} \left[1 + \alpha_s \left(\frac{v_l}{v_s} - 1 \right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中, λ_l 为单相摩阻系数, λ_{10} 为两相摩阻系数, 文献 [25] 指出, 计算两相流压降最简单的方法就是设定单向摩阻系数和两相摩阻系数相等, 即 $\lambda_l = \lambda_{10}$; ρ_l 为泥浆的密度, kg/m^3 ; v_l 为泥浆的平均流速, m/s ; α_s 为液固区段的含渣率; v_s 为岩渣的平均流速, m/s 。

根据文献 [26-28], 对于绝热流动的等截面圆管通道, 流体的加速压降较小, 可以忽略, 因此, 钻杆内液固区段的压降梯度可以表示为:

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_f + \left(\frac{dp}{dz} \right)_m = -\lambda_l \frac{\rho_l v_l^2}{2D} \phi_{10}^2 - \rho_m g \quad (13)$$

将上式沿着流体的运动方向积分, 即可获取钻杆内液固区段流体的压力表达式:

$$p_3 = p_3' - \lambda_l \frac{\rho_l v_l^2 z_i}{2D} \phi_{10}^2 - [\alpha_s \rho_s + (1 - \alpha_s) \rho_l] g z_i \quad (14)$$

式中: z_i 为钻杆液固区段元流运动的任意距离, m 。

当钻杆内的元流运动至液固区段的末端时 ($z_i = z_4$), 元流的速度和压力分别为 v_4 和 p_4 , 在同一时刻, 气相输入钻杆, 使元流密度降低, 并获取外部能量而高速上返, 因此, 当元流从注气端运动至液固气区段任意位置时(此时元流的速度和压力分别为 v_5 和 p_5), 其运动满足如下伯努利方程^[21]:

$$z_4 + \frac{p_4}{\gamma_{ls}} + \frac{v_4^2}{2g} + H = z_5 + \frac{p_5}{\gamma_{lsg}} + \frac{v_5^2}{2g} + h_3 \quad (15)$$

将上式进行化简, 即可获得钻杆内液固气区段流体的压力分布表达式:

$$p_5 = \gamma_{lsg} \left[(z_4 - z_5) + \frac{v_4^2 - v_5^2}{2g} + \frac{p_4}{\gamma_{ls}} + H - h_3 \right] \quad (16)$$

其中, 两相流和三相流的混合容重 γ_{ls} 、 γ_{lsg} 可表示为:

$$\begin{cases} \gamma_{ls} = (\alpha_l \rho_l + \alpha_s \rho_s) g \\ \gamma_{lsg} = (\alpha_{l1} \rho_l + \alpha_{s1} \rho_s + \alpha_{g1} \rho_g) g \end{cases} \quad (17)$$

式中: H 为空压机输入能量提供的有效水头; h_3 元流在液固气区段运动时的水头损失; α_l 为液固区段钻杆内多相流体的含液率; ρ_s 为岩渣的密度, kg/m^3 ; α_{l1} 为液固气区段钻杆内多相流体的含液率; α_{s1} 为液固气区段多相流体的含渣率; α_{g1} 为液固气区段多相流体的含气率; ρ_g 为气体的密度, kg/m^3 。

其中, 元流在钻杆内液固及液固气区段运动过程中的平均流速 v_3 、 v_5 ^[29] 分别由式(18)确定:

$$\begin{cases} v_3 = v_l \alpha_l + v_s \alpha_s \\ v_5 = v_{l1} \alpha_{l1} + v_{s1} \alpha_{s1} + v_{g1} \alpha_{g1} \end{cases} \quad (18)$$

式中: v_{l1} 为钻杆内液固气区段泥浆流速, m/s ; v_{s1} 为岩渣流速, m/s ; v_{g1} 为气体流速, m/s 。

根据元流的运动过程和已有的相关研究结果^[17,30], 确定钻杆内元流运动过程中的边界条件:

$$\begin{cases} p_3 = p_3', z_i = 0 \\ p_3 = p_4, z_i = z_4 \\ p_5 = p_6 = 0, z_5 = z_0 \end{cases} \quad (19)$$

根据压力模型的计算流程(图 3), 将式(14)—式(19)代入式(16)可求得钻杆入口处的初始压力 p_3' , 进而可明确钻杆内井底、液固及液固气区段的压力分布。

$$p_3' = -\gamma_{ls} \left[(z_4 - z_0) + \frac{v_4^2 - v_6^2}{2g} + H - h_i \right] + \frac{\lambda_l \rho_l v_l^2 z_4}{2D} \phi_{10}^2 + [\alpha_s \rho_s + (1 - \alpha_s) \rho_l] g z_4 \quad (20)$$

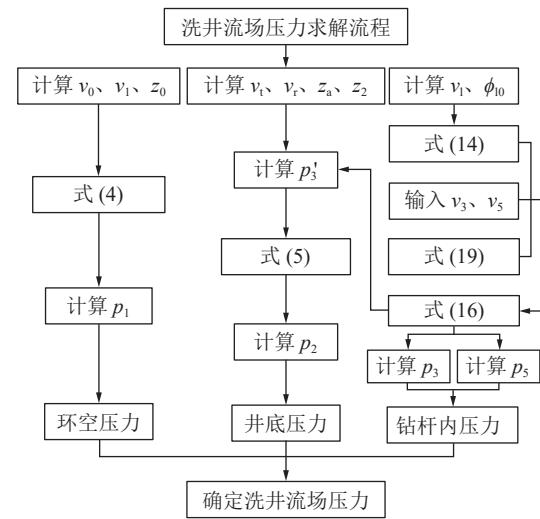


图 3 洗井流场压力求解流程
Fig.3 Flow chart of pressure solution of well washing flow field

3 压力模型验证及流体运移规律

3.1 数值模型的建立

为了研究钻井法凿井气举反循环洗井流场的分布规律, 并对洗井流场压力模型(模型参数选取见表 1)进行验证, 采用 CFD-DEM 研究方法, 建立了液-固-气多相耦合洗井的数值模型(图 4), 该模型包括钻杆、钻头、风管和井底 4 个部分。其中风管内插于钻杆内, 钻杆与井底相互连接, 钻头置于井底内部,

设置钻杆与井底为流体域, 钻头为旋转域, 钻杆与钻头以恒定转速沿 z 轴逆时针旋转。模型采用四面体网格划分方法, 并对钻头和风管进行局部加密。在模型 xoz 截面上设置H1测线和L1测线, 以监测流场中的速度与压力。在Fluent中采用多相流模型计

算流体相泥浆和空气的流动, 在EDEM中计算离散相岩渣的运动, 沿破岩面每秒生成3 000个岩渣颗粒来模拟钻渣产生, 其余边界条件及设置方法见参考文献[10], 最后经耦合接口连接实现流体相和离散相的耦合计算。

表1 压力模型参数取值
Table 1 Values of pressure model parameters

参数	符号	数值	参数	符号	数值
回浆槽截面积/ m^2	A_0	0.4	气体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_g	1.29
钻杆环空截面积/ m^2	A_1	19.38	钻杆长度/m	z_0	30
钻杆横截面积/ m^2	A	0.25	风管埋入长度/m	$z_0 - z_4$	24
液固段含渣率/%	α_s	5	泥浆黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	μ	0.16
液固气段含渣率/%	α_{s1}	3	钻头转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	w	8
含气率/%	α_{g1}	45	井底净空高度/m	h	0.56
泥浆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_l	1 100	空压机有效水头/m	H	15
岩渣密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_s	2 300	泥浆循环量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Q	1.04

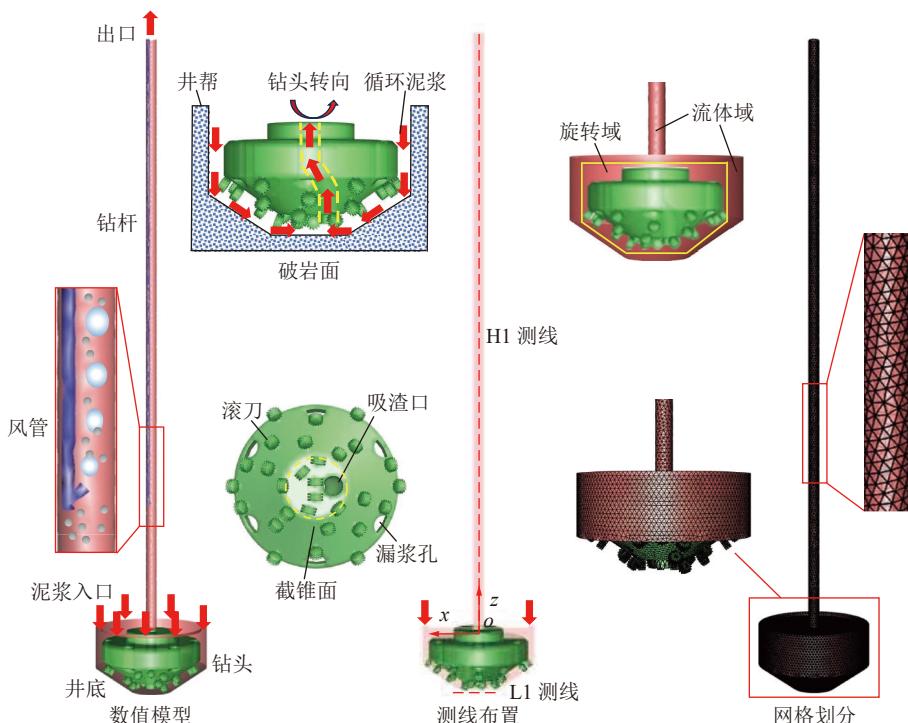


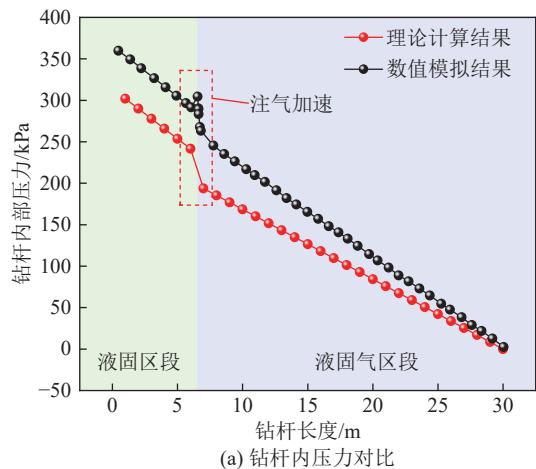
图4 气举反循环洗井数值模型
Fig.4 Numerical model of gas lift reverse circulation well washing

3.2 洗井流场压力验证

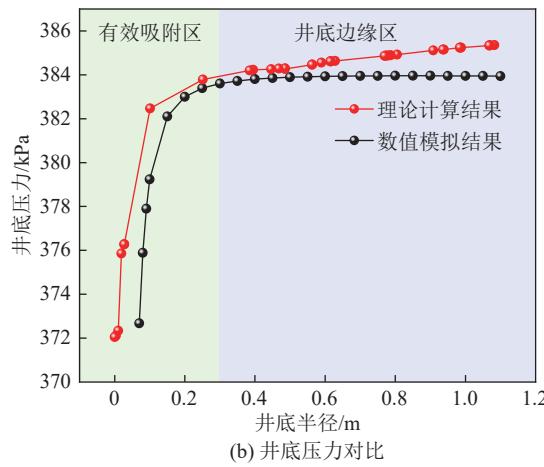
为了验证流体压力模型的正确性, 采用理论计算和数值模拟互验的方法, 对钻杆内和井底流体的压力进行误差分析。分析图5可知, 理论计算结果显示, 钻杆内液固及液固气区段流体的平均压力分别为271.8 kPa和101.1 kPa, 对应数值模拟结果分别为322.9 kPa和128.3 kPa, 与数值模拟结果相比, 理

论计算钻杆内液固及液固气区段平均相对误差分别为15.8%和21.1%; 理论计算井底有效吸附区和井底边缘区流体的平均压力分别为379.7 kPa和383.9 kPa, 对应数值模拟结果分别为377.6 kPa和384.8 kPa, 与数值模拟结果相比, 理论计算井底有效吸附区和井底边缘区的平均相对误差分别为0.6%和0.2%; 理论计算结果与数值模拟结果具有较高的

吻合性,从而验证了洗井压力模型的正确性与合理性。



(a) 钻杆内压力对比



(b) 井底压力对比

图 5 钻杆内和井底流体的压力对比

Fig.5 Pressure comparison of fluid in drill pipe and bottom hole

3.3 流体的运移规律

3.3.1 流场的速度分布

图 6 和图 7 分别为数值模型中 H1 测线、L1 测线所监测的钻杆内部和井底流体的速度分布图。

分析图 6 可知,多相流体在钻杆内的运动区间可以分为液固区段和液固气区段,在 2 个区段内,泥

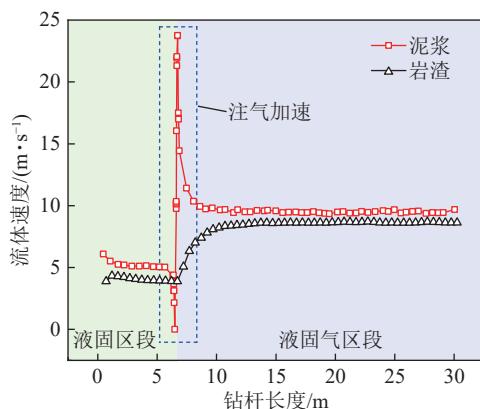
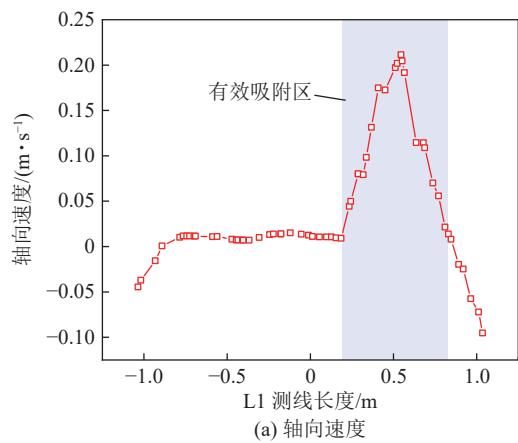
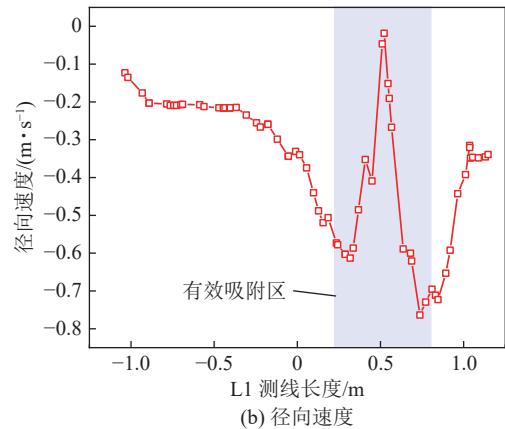


图 6 钻杆内流体的速度分布

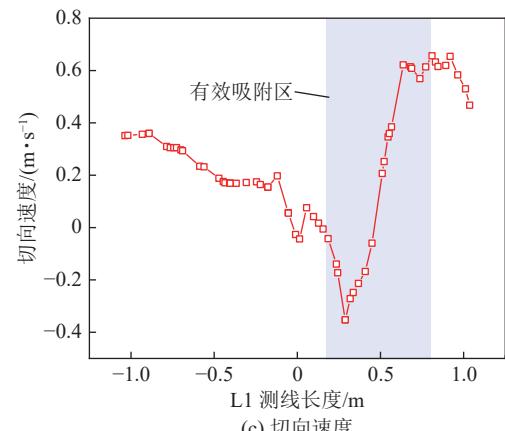
Fig.6 Velocity distribution of fluid in drill pipe



(a) 轴向速度



(b) 径向速度



(c) 切向速度

图 7 井底流体速度分布

Fig.7 Velocity distribution of bottom hole fluid

浆的轴向上返速度始终大于岩渣,且分别相较于岩渣的轴向上返速度增长 30.2% 和 12.2%,因此,只有保证携岩介质泥浆的流速足够大,且远大于岩渣在泥浆中的沉降速度,才更利于岩渣被顺利排至地面^[30];另一方面,泥浆和岩渣途经注气端时,由于气相输入,使得多相流体密度骤然降低,在气举作用下,多相流体实现“注气加速”,泥浆和岩渣的轴向上返速度实现“跳跃式”剧增,且相较液固区段分别实现 81.5% 和 110.6% 的大幅增长。

分析图 7 可知,当钻头吸渣口为扫掠式单吸渣

口时,其静止有效吸附区占井底截锥面的11.05%,随着钻头转动,吸渣口的总吸附区近似呈环状的“扫掠带”,占井底截锥面的68.8%;井底流体的轴向上返仅在吸渣口的有效吸附区较为明显,其余区域流体几乎不发生轴向运动;在吸渣口吸附作用和井底循环泥浆流的冲刷作用下,井底流体的径向速度在有效吸附区的两侧达到峰值,但随着距吸渣口距离的增大,井底流体的径向速度大幅降低,因此,在钻头边缘处,流体的径向速度较小,对岩渣的冲刷和携带作用较差,易产生岩渣堆积;吸渣口外侧流体的切向速度远大于内侧,且在吸渣口内侧,流体的切向速度随钻头水力半径的增大而增大;截锥型钻头水平井底流体的平均径向流速>切向速度>轴向速度,其中,以L1测线所监测的流场速度为例,水平井底流体的平均径向流速分别是切向流速和轴向流速的1.6倍和9.4倍。

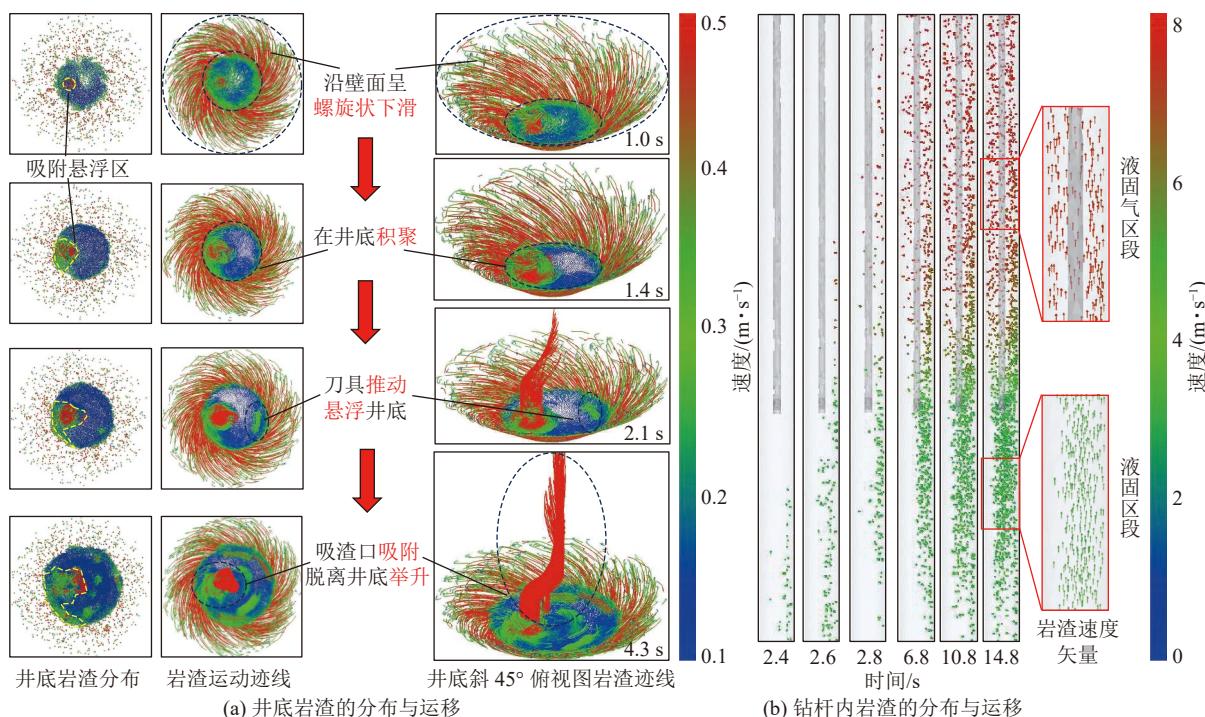


图8 井底和钻杆内岩渣的分布与运移

Fig.8 Distribution and migration of rock slag in bottom hole and slag discharge pipe

4 洗井流场压力的因素分析

为了进一步明晰洗井流场压力的分布规律,采用控制变量法单因素分析含气率、泥浆密度、泥浆黏度、岩渣密度和含渣率对洗井过程中钻杆内部、井底以及钻杆环空流体的压力分布规律。

4.1 含气率

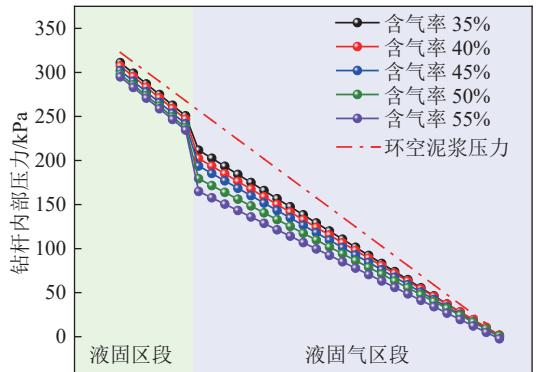
钻杆内液固气区段的含气率与注气流量呈正相关关系,是影响钻杆内多相流体压力的重要参数^[31],

3.3.2 岩渣的运移特征

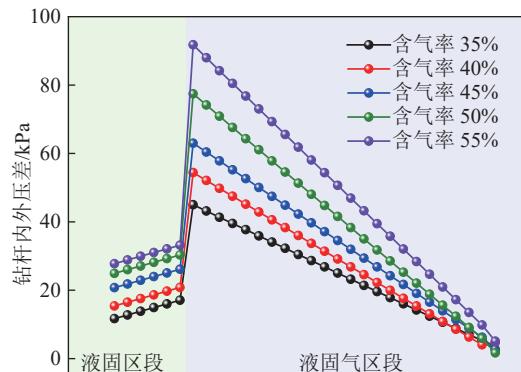
基于数值模拟计算结果,选取了不同时刻井底和钻杆内岩渣的分布状态(图8),分析其运移规律。分析图8可知,截锥型钻头的破岩面呈“碗状”结构,包括水平破岩面和倾斜破岩面,在钻头转动、泥浆冲刷和重力作用下,岩渣沿倾斜破岩面呈螺旋状下滑,随着破碎岩渣数量越来越多,岩渣在水平井底产生积聚,此时岩渣在刀具的推动下,克服泥浆的压持效应而悬浮井底,在吸渣口吸附作用下,井底吸附悬浮区越来越大,进而岩渣脱离破碎穴被吸附举升进入钻杆内,直至排出地面,因此岩渣在井底的运移方式可归结为“螺旋状下滑—井底积聚—推动和悬浮—吸附和举升”的动态循环运移。钻杆内的多相流体先后分别以“液固”和“液固气”的形态运移,在液固区段,多相流体以“低流速,高密度”形式流动,在液固气区段,则以“高流速,低密度”形式流动。

因此保持其他参数不变,改变钻杆内含气率分别为35%、40%、45%、50%和55%,研究含气率对洗井流场压力的影响规律,计算结果如图9、图10所示。

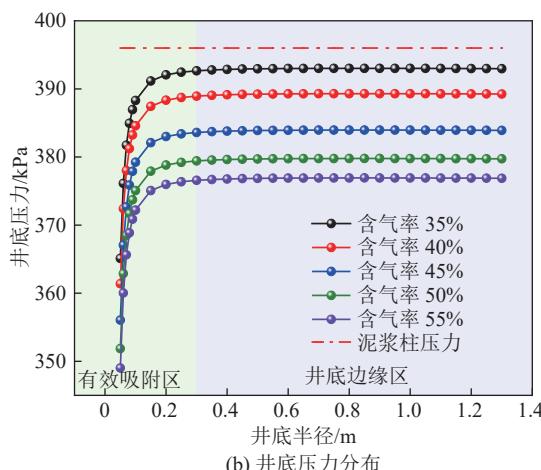
分析图9和图10可知,钻杆内流体压力沿井口方向近似呈线性降低趋势,钻杆内外的压差分别在液固和液固气区段呈“先增加,后降低”的线性变化,在注气端处,流体压力骤降,钻杆内外的压差达到最大,这是因为途经注气端时,由于气相输入,使钻杆



(a) 钻杆内压力分布



(a) 钻杆内压差



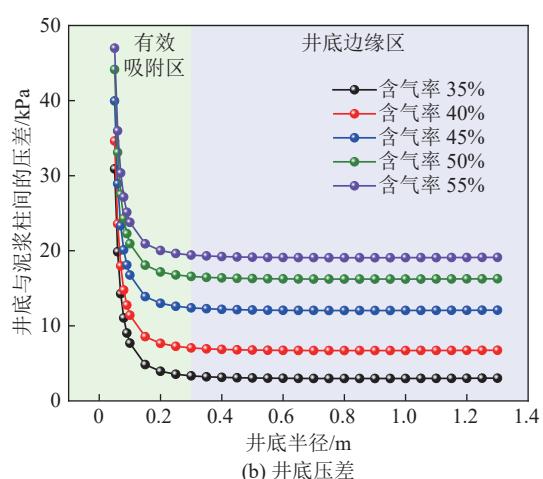
(b) 井底压力分布

图9 含气率对流体压力的影响

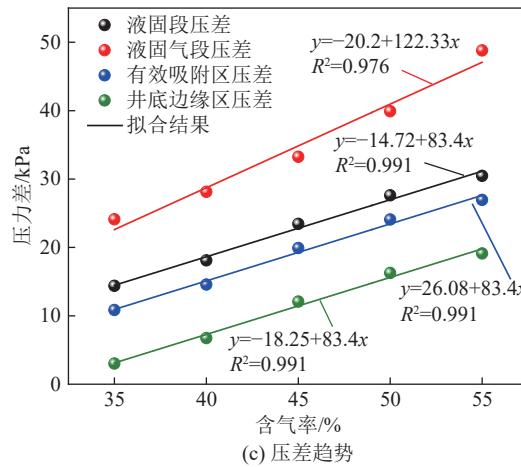
Fig.9 Influence of void fraction on fluid pressure

内多相流体的密度和压力骤然降低,在钻杆内部形成负压,进而增大了钻杆内部与钻杆环空泥浆柱之间的压力差,多相流体被注气加速,以高流速排至地面。由于吸渣口的吸附作用,井底流体压力自外向内呈“先小幅降低,后大幅降低”趋势,在井底有效吸附区流体压力降低幅度及速率更大,与外部泥浆柱形成鲜明压差,井底流体更易被吸附举升。钻杆内和井底流场的压差分布的显著性可以归结为:液固气区段>液固区段>有效吸附区>井底边缘区。

含气率对钻杆内和井底流体的压力具有显著影响,随着钻杆内含气率增加,钻杆内和井底流体的压力均大幅降低,钻杆内外流体压差和井底压差均大幅增加,与含气率近似呈线性正相关关系,且含气率对钻杆内液固气区段压差的影响更为显著。当钻杆内含气率从35%增加至55%时,钻杆内流体的平均压力降低24.68 kPa,钻杆内外压差相对增长103.6%,井底流体的平均压力降低16.1 kPa,井底压差相对增长285.6%。当钻杆内含气量增加时,会大幅降低多相流体的混合密度,使多相流体保持“轻质,低压”的状态,有利于多相流体以高流速上返,增强气举反循



(b) 井底压差



(c) 压差趋势

图10 含气率对钻杆内外、井底压差的影响

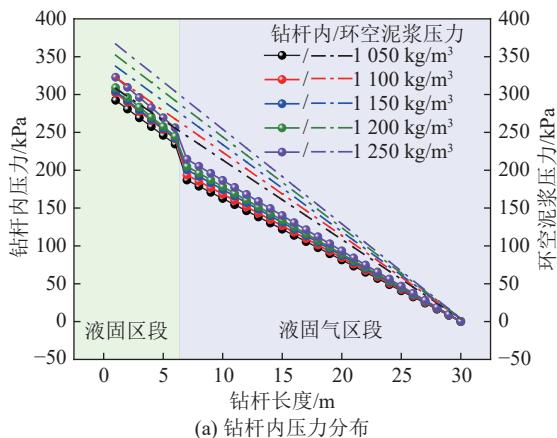
Fig.10 Influence of void fraction on pressure difference between inside and outside of drill pipe and bottom hole

环系统的泥浆循环能力,另一方面,增大钻杆内部含气率,可以有效减缓井底压力和泥浆的压持效应,增大井底流体与泥浆柱之间的压力差,使井底岩渣更容易被悬浮和吸附举升,进而提高洗井效率。

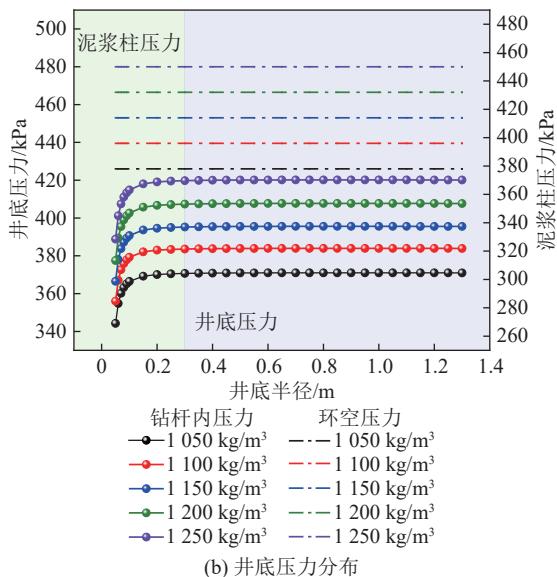
4.2 泥浆密度与泥浆黏度

泥浆作为输送岩渣的主要载体,其密度、黏度对

洗井效率和流场压力分布有显著影响,因此保持其他参数不变,改变泥浆密度分别为1 050、1 100、1 150、1 200和1 250 kg/m³,改变泥浆黏度分别为0.10、0.16、0.22、0.28和0.34 Pa·s,研究泥浆密度和黏度对洗井流场压力的影响规律,计算结果如图11—图12所示。



(a) 钻杆内压力分布



(b) 井底压力分布

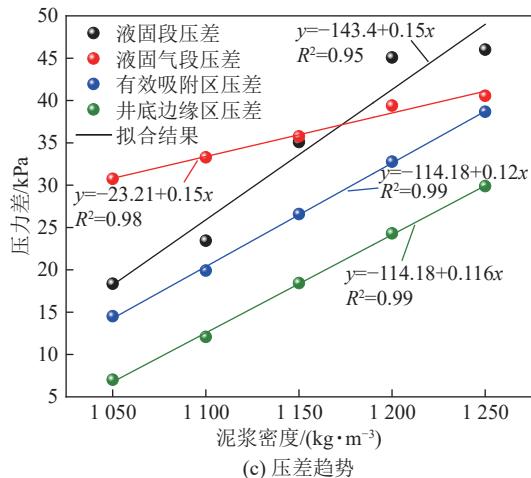
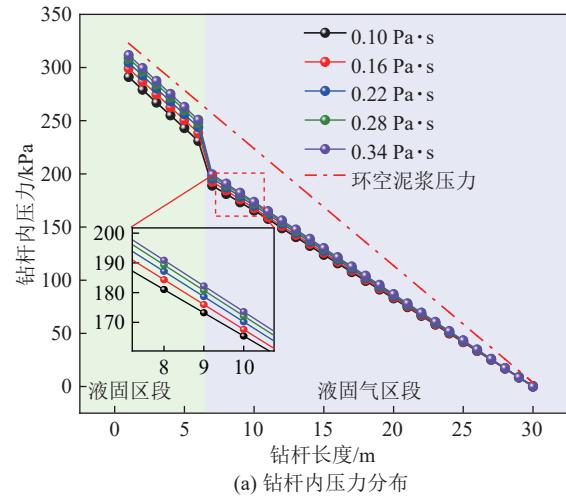
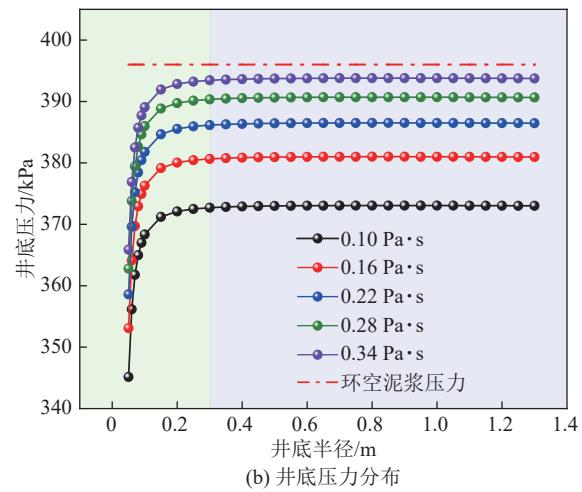


图11 泥浆密度对流体压力的影响

Fig.11 Influence of mud density on fluid pressure



(a) 钻杆内压力分布



(b) 井底压力分布

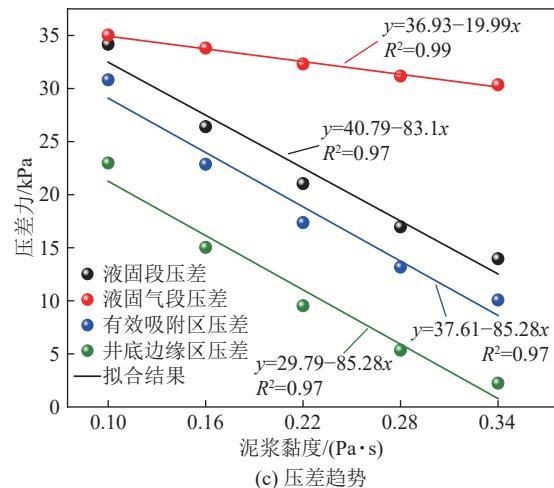


图12 泥浆黏度对流体压力的影响

Fig.12 Influence of mud viscosity on fluid pressure

分析图11和图12可知,泥浆密度和黏度对流场压力产生不同的影响,其中钻杆内部、井底和钻杆环空流体的压力均随泥浆密度的增大而增大,由于钻杆环空泥浆柱的压力增长速率更大,导致钻杆内外压差和井底压差也随泥浆密度的增加呈线性增加趋势;泥浆黏度与钻杆内、井底流体压力呈正相关关

系, 对钻杆环空流体压力几乎不产生影响, 因此, 钻杆内外压差和井底压差均随泥浆黏度的增加呈线性降低趋势。

当泥浆密度由 1050 kg/m^3 增加至 1250 kg/m^3 时, 钻杆内流体的平均压力增长 16.3 kPa , 井底流体平均压力增长 48.7 kPa , 钻杆外环空流体平均压力增长 29.67 kPa , 井底泥浆柱压力平均增长 72 kPa , 导致钻杆内外压差增大 47.3% , 井底压差增大 244.5% 。当增大泥浆密度时, 钻杆内外流体的压力均大幅增长, 由于钻杆内气相输入, 使得钻杆液固气区段流体压力涨幅受限, 进而钻杆外流体压力增长速率大于钻杆内部, 因此, 钻杆内外压差随着泥浆密度的增大而增大, 另一方面, 结合钻井现场实际情况, 泥浆密度一般为 $1100 \sim 1250 \text{ kg/m}^3$, 泥浆密度过小, 起不到平衡地压作用, 泥浆密度过大, 井帮护壁易脱落、井壁难以下沉, 因此, 泥浆密度的调配应结合实际工况。

当泥浆黏度由 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 增加至 $0.34 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 钻杆内流体的平均压力增长 7.8 kPa , 井底流体平均压力增长 20.74 kPa , 钻杆内外流体泥浆压差降低 22.3% , 井底压差降低 81.03% 。增大泥浆黏度, 会使多相流体流动性变差, 沿程损失增大, 且在钻杆液固气区段气相难以与高黏度流体充分均匀融合, 不易形成均匀的“低密度, 低压力”的混合流体, 钻杆内外不易形成较大的压差, 多相流体的上返流速也会受到阻碍, 另一方面, 在钻井现场钻至侏罗系泥岩、泥质砂岩等含“泥”地层时, 因该地层富含 Mg^{2+} , 高浓度的 Mg^{2+} 促使蒙脱石层间阳离子与之交换, 并破坏其空间结构, 蒙脱石絮凝程度加剧, 导致泥浆黏度大幅增加^[32], 从而造成气举反循环受阻、泥浆循环效果变差、泥包钻头严重、钻进和洗井效率低下等工程难题, 因此监测并及时改善泥浆黏度对保证钻进和洗井效率十分有必要。

4.3 岩渣密度与含渣率

井底岩渣的清洁程度是评判洗井效率的主要标准, 岩渣密度和钻杆内的含渣率对岩渣的输送和运移、多相流体压力分布有重要影响, 因此保持其他参数不变, 改变岩渣密度分别为 1700 、 2000 、 2300 、 2600 和 2900 kg/m^3 , 改变钻杆液固区段含渣率分别为 1% 、 3% 、 5% 、 7% 和 9% , 改变钻杆液固气区段含渣率分别为 1% 、 2% 、 3% 、 4% 和 5% , 研究岩渣密度和含渣率对洗井流场压力的影响规律, 计算结果如图 13 和图 14 所示。

分析图 13 和图 14 可知, 钻杆内与井底多相流体的压力均随岩渣密度的增大而增大, 钻杆内液固

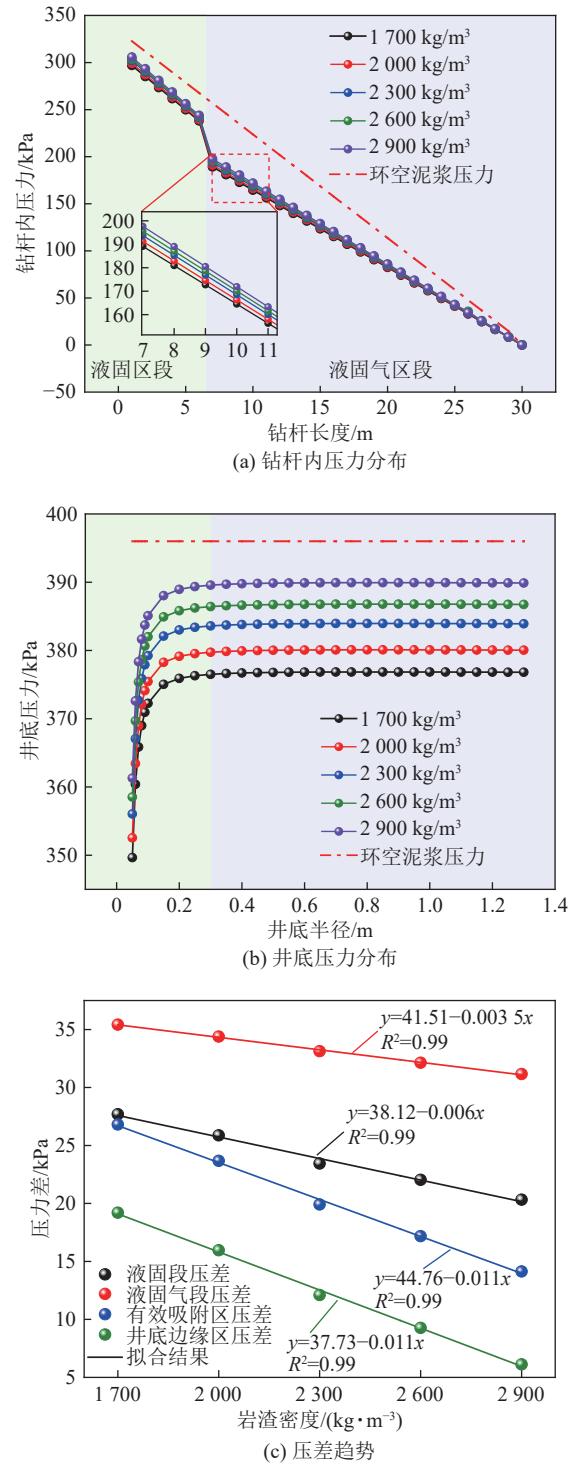


图 13 岩渣密度对流体压力的影响
Fig.13 Influence of rock slag density on fluid pressure

及液固气区段流体压力随含渣率的增加而增大, 但是钻杆内外压差则随岩渣密度与含渣率的增大而降低, 且均与两者呈线性负相关关系。当钻杆内岩渣密度由 1700 kg/m^3 增至 2900 kg/m^3 时, 钻杆和井底的平均压力分别增加 4.88 kPa 和 12.95 kPa , 钻杆内外压差和井底压差则分别降低 14.4% 和 59.6% 。钻杆内液固区段的含渣率由 1% 增加至 9% 时, 液固区

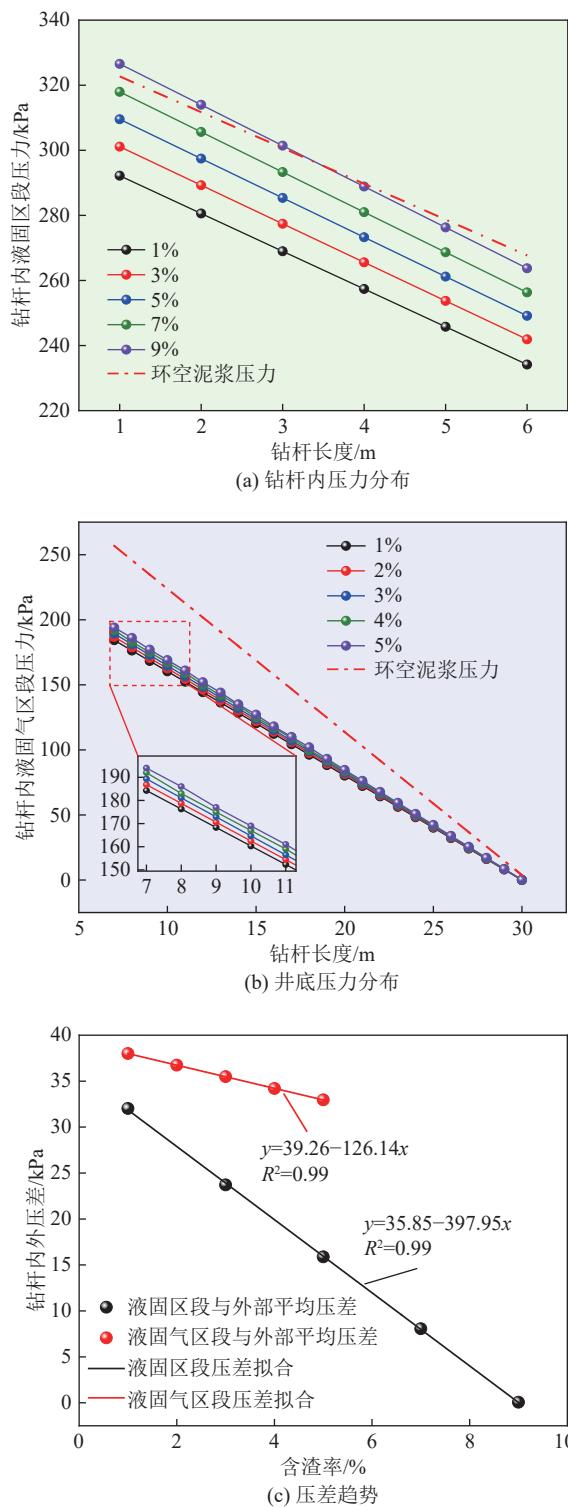


图 14 含渣率对流体压力的影响

Fig.14 Influence of slag content on fluid pressure

段流体压力增加 31.97 kPa, 与钻杆环空流体压力近乎持平, 该含渣率已经超出了文献 [33] 所给出的 3%~6% 的限值, 若使岩渣顺利排出, 需增大注气流量, 降低多相流体的混合密度, 增大钻杆内外压差, 使多相流体获取高流速排至地面。钻杆内液固气区段的含渣率由 1% 增加至 5% 时, 液固气区段流体压

力增加 5.03 kPa, 与外部环空的压差则相对降低 13.2%。综上所述, 钻杆内岩渣密度越大, 含渣率越高, 越不利于钻杆内多相流体保持负压状态, 多相流体则不易获取高流速排出地面, 因此, 在钻井现场还需时刻监测排渣效率, 一旦发现岩渣排出困难, 则需采取“高钻压、低转速”的钻进措施, 使岩渣充分破碎, 或增大注气流量, 使钻杆内多相流体再次被提速, 或在允许范围内增大泥浆黏度, 增强泥浆的携岩性能。

4.4 因素敏感性分析

因素敏感性分析是衡量研究对象受因素影响大小的一种方法^[34-35], 如果将钻杆内外流体的平均压差 $\Delta \bar{p}$ 作为评判指标, 将含气率 α_{g1} 、泥浆密度 ρ_1 、泥浆黏度 μ 、岩渣密度 ρ_s 、液固段含渣率 α_s 、液固气段含渣率 α_{s1} 作为影响因素, 分析上述因素对钻杆内外流体平均压差的影响大小。因素敏感系数计算公式如式(21)所示, 以上评判指标与影响因素之间满足式(22)函数关系, 各参数的敏感性计算结果如图 15 所示:

$$i = \delta_y / \delta_x \quad (21)$$

式中: i 为因素敏感系数; δ_x 为影响因素的变化率; δ_y 为研究对象的变化率。

$$\Delta \bar{p} = f(\alpha_{g1}, \rho_1, \mu, \rho_s, \alpha_s, \alpha_{s1}) \quad (22)$$

分析图 15 可知, 含气率、泥浆密度、泥浆黏度、岩渣密度、液固段含渣率和液固气段含渣率所对应的敏感性系数分别为 1.648、2.469、-0.163、-0.303、-0.137 和 -0.093, 其中含气率、泥浆密度与钻杆内外流体压差呈正相关关系, 泥浆黏度、岩渣密度、液固

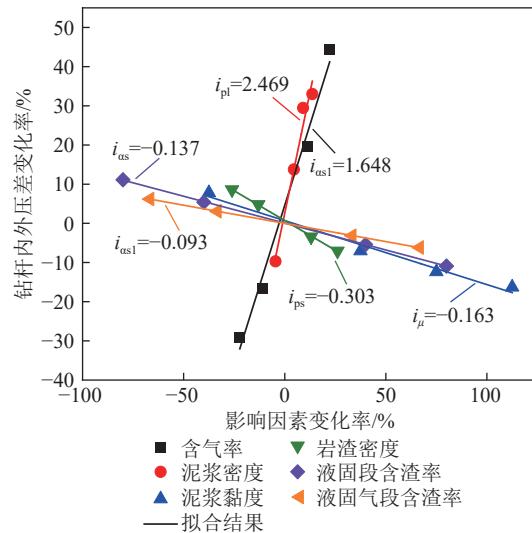


图 15 钻杆内外流体压差因素敏感性分析

Fig.15 Sensitivity analysis of pressure difference factors between internal and external fluids of drill pipe

段含渣率、液固气段含渣率与钻杆内外流体压差呈负相关关系,且各因素对钻杆内外流体压差的敏感性可归结为:泥浆密度>含气率>岩渣密度>泥浆黏度>液固段含渣率>液固气段含渣率。

5 结 论

1) 基于流体力学相关理论,建立了钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力数学模型,给出了钻杆环空,井底和钻杆内部流体压力的理论解析解,并获取了洗井流场中流体压力的分布规律,且得到数值模拟的验证。

2) 建立了液固气多相耦合洗井的数值模型,基于数值模拟结果,钻杆内泥浆的轴向速度始终大于岩渣,在途经注气端时,两者均被“注气加速”,上返流速实现“跳跃式”剧增;截锥型钻头水平井底流体的平均径向流速>切向速度>轴向速度;岩渣在井底的运移方式可归结为“螺旋状下滑—井底积聚—推动和悬浮—吸附和举升”的动态循环运移,在钻杆内液固及液固气区段则分别以“低流速,高密度”和“高流速,低密度”形式运移。

3) 钻杆内流体压力沿井口方向近似呈线性降低趋势,钻杆内外的压差分别在液固和液固气区段呈“先增加,后降低”的线性变化,在注气端处,流体压力骤降,钻杆内外的压差达到最大;井底流体压力自外向内呈“先小幅降低,后大幅降低”趋势,在井底有效吸附区流体压力降低幅度及速率更大。

4) 含气率、泥浆密度与钻杆内外流体压差呈正相关关系,泥浆黏度、岩渣密度、液固段含渣率、液固气段含渣率与钻杆内外流体压差呈负相关关系,各因素对钻杆内外流体压差的敏感性可归结为:泥浆密度>含气率>岩渣密度>泥浆黏度>液固段含渣率>液固气段含渣率。

参考文献(References):

- [1] 袁亮,徐良骥.高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践[J].煤炭学报,2024,49(1):65–74.
YUAN Liang, XU Liangji. Conception and practice of resource utilization, energization and functionalization of coal mining subsidence areas with high groundwater level[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 65–74.
- [2] 王国法,庞义辉,许永祥,等.厚煤层智能绿色高效开采技术与装备研发进展[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):882–893.
WANG Guofa, PANG Yihui, XU Yongxiang, et al. Development of intelligent green and efficient mining technology and equipment for thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 882–893.
- [3] 程桦,郭龙辉,姚直书,等.钻井法凿井气举反循环多相排渣运移规律及其洗井参数优化试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):224–237.
CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Experimental study on transport law of multiphase slag discharge and optimization of well washing parameters in gas lift reverse circulation of drilling shaft sinking[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 224–237.
- [4] 范京道,魏东,汪青仓,等.智能化建井理论技术研究与工程实践[J].煤炭学报,2023,48(1):470–483.
FAN Jingdao, WEI Dong, WANG Qingcang, et al. Theory and practice of intelligent coal mine shaft excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 470–483.
- [5] 范京道,封华,宋朝阳,等.可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J].煤炭学报,2022,47(1):499–514.
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 499–514.
- [6] 崔明远,刘锦玉,李翔宇,等.钻井法凿井在我国西部地区的应用分析:以可可盖煤矿进风立井采用钻井法施工为例[J].建井技术,2022,43(5):67–70,48.
CUI Mingyuan, LIU Jinyu, LI Xiangyu, et al. Analysis on mine shaft drilling method applied to mine shaft sinking in western China area: Taking the construction of air inlet shaft in kekegai coal mine as an example[J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(5): 67–70, 48.
- [7] 姚直书,许永杰,程桦,等.西部钻井法“一钻成井”新型高强复合井壁力学特性[J].煤炭学报,2023,48(12):4365–4379.
YAO Zhishu, XU Yongjie, CHENG Hua, et al. Mechanical properties of a new high-strength composite shaft lining for the “one drilling and forming process” drilling method in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4365–4379.
- [8] 刘志强,宋朝阳,纪洪广,等.深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J].煤炭学报,2021,46(3):826–845.
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, JI Hongguang, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826–845.
- [9] GUO L H, CHENG H, YAO Z S, et al. CFD-DEM method is used to study the multi-phase coupling slag discharge flow field of gas-lift reverse circulation in drilling shaft sinking[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 13853.
- [10] 程桦,郭龙辉,姚直书,等.钻井法凿井气-液-固耦合排渣流场及刀盘吸渣口优化[J].煤炭学报,2024,49(1):426–441.
CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Research on the gas-liquid-solid coupled slag discharge flow field and optimization of cutterhead slag suction port in shaft drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 426–441.
- [11] 姚直书,方玉,乔帅星,等.孔隙型含水岩层钻井井壁后充填技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):1–9.
YAO Zhishu, FANG Yu, QIAO Shuaixing, et al. Research on

- backfill technology of drilling shaft sinking method in porous water-bearing rock stratum[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 1–9.
- [12] 姚直书, 李欣慰, 程桦, 等. 西部含水弱胶结围岩-充填层-钻井井壁流固耦合作用机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1177–1190.
- YAO Zhishu, LI Xinwei, CHENG Hua, et al. Analysis of fluid-solid coupling mechanism of water-bearing weakly cemented surrounding rock-filling layer-drilling shaft lining in the west of China[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1177–1190.
- [13] 张智, 向世林, 冯潇霄, 等. 深水油气井非稳态测试环空压力预测模型[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 80–87.
- ZHANG Zhi, XIANG Shilin, FENG Xiaoxiao, et al. An annulus pressure prediction model for deepwater oil & gas wells during unsteady-state testing[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 80–87.
- [14] 刘平江, 和建勇, 张晔, 等. 高温深井温压耦合下流体性质对井筒压力的影响特性[J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(3): 288–295.
- LIU Pingjiang, HE Jianyong, ZHANG Ye, et al. Study on effects of fluid properties on borehole pressure under temperature and pressure coupling in high temperature deep wells[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(3): 288–295.
- [15] 王小兵, 龚浩宇, 李森, 等. 泡沫流体反循环洗井携屑能力研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(9): 67–74.
- WANG Xiaobing, GONG Haoyu, LI Sen, et al. Particle carrying capacity of foam fluid for reverse circulation well cleanup[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(9): 67–74.
- [16] WANG H Z, LI X J, SEPEHRNOORI K, et al. Calculation of the wellbore temperature and pressure distribution during supercritical CO₂ fracturing flowback process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 10–16.
- [17] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省, 等. 煤矿巷道底板锚固孔钻渣导升运移规律及影响因素研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(3): 584–597.
- FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Study on migration rules and influencing factors of the fragments ascending during boreholes drilling rock in coal mine roadway floors[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(3): 584–597.
- [18] 范宇, 方永, 吴鹏程, 等. 页岩气钻井岩屑运移规律仿真分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 11532–11538.
- FAN Yu, FANG Yong, WU Pengcheng, et al. Simulation analysis of cuttings migration in shale gas drilling[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 11532–11538.
- [19] 姚建林. 气体钻井环空流场分析及岩屑对管柱的冲蚀特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- YAO Jianlin. Investigations of flow field in annulus and erosion characteristics on the pipe with cuttings in gas drilling[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.
- [20] YANG L, LI Y, WANG D G, et al. Research on deposition particles carrying with washing tools during well cleaning[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219: 111097.
- [21] 李翠平, 王勇. 工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [22] 付孟雄. 煤矿巷道底板锚固孔钻渣运移规律与钻具优化研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- FU Mengxiong. Study on the fragments moving characteristics and drilling tool optimization of floor boreholes in coal mine roadways[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [23] 周英操, 高德利, 刘永贵. 欠平衡钻井环空多相流井底压力计算模型[J]. *石油学报*, 2005, 26(2): 96–99.
- ZHOU Yingcao, GAO Deli, LIU Yonggui. New model for calculating bottom hole pressure of multiphase flow in annulus of underbalanced straight well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(2): 96–99.
- [24] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [25] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 3版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- [26] 陶丽杰. 气体钻井流动参数计算[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- TAO Lijie. Computation of flow parameters for gas drilling[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [27] 廖锐全, 汪崎生, 张柏年. 井筒多相管流压力梯度计算新方法[J]. *江汉石油学院学报*, 1998, 20(1): 59–63.
- LIAO Ruiquan, WANG Qisheng, ZHANG (Bai) Bo (Nian). A method for predicting vertical multiphase flow pressure gradient in vertical wellbore[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 1998, 20(1): 59–63.
- [28] 韩洪升, 陈家琅. 油井内多相流动压力分布的计算方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 1990, 9(2): 49–59.
- HAN Hongsheng, CHEN Jialang. Calculation method for multiphase flow pressure distribution in oil wells[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1990, 9(2): 49–59.
- [29] GUO L H, CHENG H, YAO Z S, et al. Mathematical model of velocity and distribution law in gas lift reverse circulation well washing flow field for drilling shaft sinking[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 27327.
- [30] 焦宁, 王衍森, 孟陈祥. 竖井掘进机空气洗井流场与携渣效率的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 522–531.
- JIAO Ning, WANG Yansen, MENG Chenxiang. Numerical simulation on the flow field and slag carrying efficiency of air flush drilling for vertical shaft boring machine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 522–531.
- [31] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 基于重力排渣的大直径井筒钻掘技术与工艺体系研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 272–282.
- LIU Zhiqiang, SONG ZhaoYang, CHENG Shouye, et al. Research on technology and equipment system of large diameter shaft drilling based on gravity slagging[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 272–282.
- [32] 周文龙, 荣传新, 程桦, 等. 白垩侏罗系地层钻井法钻井液黏度突变致因分析[J]. *建井技术*, 2024, 45(1): 56–64.
- ZHOU Wenlong, RONG Chuanxin, CHENG Hua, et al. Analysis of sudden change of viscosity of drilling fluid by drilling method

- in Cretaceous Jurassic strata [J]. Mine Construction Technology, 2024, 45(1): 56–64.
- [33] 张永成, 孙杰, 王安山. 钻井技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
- [34] 张佳明, 程桦, 张亮亮. 厚松散层薄基岩煤层开采地表沉降速度及其影响因素研究 [J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 151–159.
- ZHANG Jiaming, CHENG Hua, ZHANG Liangliang. Research on surface subsidence velocity and influencing factors by coal mining under thick loose layers and thin bedrock [J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(6): 151–159.
- [35] 蔡海兵, 黄以春, 李阳. 基于随机介质理论的土体融沉预测及其参数敏感性分析 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 107–111.
- CAI Haibing, HUANG Yichun, LI Yang. Prediction of surface thawing settlement based on stochastic medium theory and parameter sensitivity analysis [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 107–111.