



深层页岩欠平衡钻井气液固三相瞬态流动传热模型研究

张文平 许争鸣 吕泽昊 赵雯

Research on a Transient Flow Heat Transfer Model of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow for Unbalanced Drilling in Deep Shale Wells

ZHANG Wenping, XU Zhengming, LYU Zehao, ZHAO Wen

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深层页岩气水平井多尺度裂缝压裂技术

Multi-Scale Hydraulic Fracturing of Horizontal Wells in Deep Shale Gas Plays

石油钻探技术. 2017, 45(6): 77-82 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706014>

基于等效毛细管的低渗透气藏液相侵入模型

Equivalent Capillary-Based Liquid Phase Invasion Model for Low Permeability Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(1): 107-111 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019007>

海上非凝结气与过热蒸汽混注井筒传热特征研究

Characteristics of Heat Transfer in Offshore Wellbores with Non-Condensing Gases Flow Coupled with Overheated Steam

石油钻探技术. 2017, 45(5): 92-97 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705016>

威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术

Water Based Drilling Fluid Technology for Deep Shale Gas Horizontal Wells in Block Weiyuan

石油钻探技术. 2019, 47(2): 21-27 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019022>

逆流自吸效应对页岩油储层坍塌压力的影响研究

The Influence of Countercurrent Spontaneous Imbibition on the Collapse Pressure of Shale Oil Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(1): 37-44 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018138>

基于相变蓄热原理的深井钻井液降温实验研究

Experimental Study of Drilling Fluid Cooling in Deep Wells Based on Phase Change Heat Storage

石油钻探技术. 2021, 49(1): 53-58 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020131>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2023089

引用格式: 张文平, 许争鸣, 吕泽昊, 等. 深层页岩欠平衡钻井气液固三相瞬态流动传热模型研究 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(5): 96-105.

ZHANG Wenping, XU Zhengming, LYU Zehao, et al. Research on a transient flow heat transfer model of gas-liquid-solid three-phase flow for unbalanced drilling in deep shale wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(5): 96-105.

深层页岩欠平衡钻井气液固三相瞬态流动 传热模型研究

张文平¹, 许争鸣², 吕泽昊³, 赵 雯⁴

(1. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 3. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007; 4. 中国石油青海油田分公司采气二厂, 青海茫崖 816499)

摘 要: 井底压力的准确预测和有效控制是深层页岩欠平衡钻井作业的关键, 但岩屑及环空流体与周围环境之间的对流换热对传统井底压力计算模型精度的影响较大。为此, 建立了瞬态非等温井筒气液固三相流动模型, 根据连续性方程和动量守恒方程, 计算了流体速度、相体积分数和压力, 并求解了不同径向层的能量守恒方程, 得到了整个井筒-地层系统的温度分布, 并采用迭代法, 耦合求解了深度和径向方向上的温度、压力和流体性质; 模型计算结果与欠平衡钻井作业的现场数据之间误差小于 5.0%, 验证了该模型的准确性与可靠性。基于所建立的模型, 对比分析了考虑和不考虑岩屑存在及对流换热效应时预测的压力和温度差异, 分析了欠平衡压差、机械钻速、地温梯度等因素对井筒压力和温度分布的影响规律。深层页岩欠平衡钻井气液固三相瞬态流动传热模型为控压钻井、欠平衡钻井在深层页岩油气中的高效应用提供了理论支撑。

关键词: 深层页岩; 欠平衡钻井; 气液固三相流; 流动传热; 瞬态模型

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)05-0096-10

Research on a Transient Flow Heat Transfer Model of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow for Unbalanced Drilling in Deep Shale Wells

ZHANG Wenping¹, XU Zhengming², LYU Zehao³, ZHAO Wen⁴

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 3. PetroChina Oil & Gas and New Energy Company, Beijing, 100007, China; 4. The No.2 Gas Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Mangya, Qinghai, 816499, China)

Abstract: Accurate prediction and effective control of bottom hole pressure (BHP) are crucial for underbalanced drilling of deep shale wells. However, convective heat transfer in cuttings, annulus fluid, and surrounding environment significantly impacts the accuracy of traditional BHP calculation models. Therefore, a transient non-isothermal flow model of gas, liquid, and solids within the wellbore was developed. Based on the continuity equation and momentum conservation equation, fluid velocity, phase volume fractions, and pressure were calculated. Meanwhile, the energy conservation equation for different radial layers was solved to obtain the temperature distribution of the entire wellbore-formation system. The temperature, pressure, and fluid properties in the depth and radial directions were coupled and solved using an iterative method. The calculated results of this model exhibited an error of less than 5.0% compared with the field data from underbalanced drilling operations, demonstrating its accuracy and reliability. With the proposed model, a comparative analysis was conducted to assess the differences in pressure and temperature predictions when the presence of cuttings and convective

收稿日期: 2023-05-18; 改回日期: 2023-08-27。

作者简介: 张文平 (1989—), 男, 湖北随州人, 2012 年毕业于中国地质大学 (武汉) 石油工程专业, 2019 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 副研究员, 主要从事钻井工艺与井下工具研究。E-mail: zhangwp.sripe@sinopec.com。

通信作者: 许争鸣 (1992—), xuzm@cugb.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“气体非平衡溶解对深井气侵井筒气-液两相流影响机制研究” (编号: 52104009)、中国石化科技攻关项目“涪陵页岩气田提高采收率技术研究” (编号: P22183) 和“页岩气超长水平段水平井钻完井关键技术研究” (编号: P22095)、中国石化页岩油气钻完井及压裂重点实验室开放基金项目“页岩油气长水平井钻井管柱与岩屑床耦合摩阻机理及优化研究” (编号: 35800000-23-ZC0613-0005) 联合资助。

heat transfer effects were considered or neglected. The study also analyzed the impact of factors such as underbalanced pressure difference, rate of penetration (ROP), and geothermal gradient on wellbore pressure and temperature distribution. The transient flow heat transfer model of gas, liquid, and solid phases for underbalanced drilling in deep shale wells provides theoretical support for the efficient application of managed pressure drilling and underbalanced drilling in deep shale oil and gas reservoirs.

Key words: deep shale; underbalanced drilling; gas-liquid-solid three-phase flow; flow heat transfer; transient model

深层页岩气钻井面临高温高压、缝洞发育导致井漏事故频发、溢流和漏失同存、深部地层机械钻速低和井壁失稳等挑战,为提高深层页岩气钻进安全系数和效率,可采用欠平衡钻井技术实现井底压力精确控制和提速提效^[1-8]。欠平衡钻井是一种将井筒压力保持在被钻地层压力以下,允许地层流体流入井筒并从地面循环出来的技术。使用低密度钻井液或注入惰性气体可以产生欠平衡状态。与常规钻井相比,欠平衡钻井可以减少地层损伤、提高钻速、降低漏失量、降低压差卡钻风险和快速显示产层等^[9-14]。有效控制井底压力,避免大量地层流体侵入和地面环空压力过高是欠平衡钻井作业成功的关键。在欠平衡钻井时,注入液体、侵入气体和岩屑在井筒中共存,为了更好地表征流动特性和分析井下数据,需要建立钻杆内液相管流流动模型、储层侵入速率模型、环空内气液固流动模型和井筒与地层间的对流换热模型^[15-17]。学者们研究了欠平衡钻井过程中的流型转变边界和不同流型下流动参数^[18]、井底压力自动控制^[19]、井眼清洁效率^[20]、储层表征^[21-22]等。然而,大多数研究忽略了岩屑对井筒多相流动的影响,直接应用气液两相流的均相模型^[23]、漂移流模型^[24]或双流体模型^[25]模拟井筒内的多相流动特性和优化欠平衡钻井参数。欠平衡钻井技术已应用于陆上^[26-27]和海上深层油藏^[28-29]的开发,已经证实了流体温度沿井筒深度变化会影响流体性质(密度、黏度等),进而影响多相流动特性。因此,将环空流体与周围环境之间的对流换热嵌入多相流模型是非常重要的。

两相流模型在计算中浅层地层压力和温度时精度可满足工程需求,但随着深度和温度增加,计算精度会大幅度降低。当前模拟欠平衡钻井井筒中气液固三相流动传热特性的模型较少,且大多为等温稳态模型和不考虑岩屑的影响,影响了深部地层井底压力预测的准确性。此外,明确井筒多相流动动态演变特性,可以为现场作业者调整作业参数、实现欠平衡钻井作业性能最大化提供理论指导。因此,建立瞬态-非等温的气液固三相流动模型,可模

拟欠平衡钻井作业过程中的压力、温度、相体积分数和流体性质变化规律,基于建立模型明确了关键参数对井筒中气液固三相流体动态流动和传热特性的影响规律,为控压钻井、欠平衡钻井在深层页岩油气中的高效应用提供了理论支撑。

1 气液固三相瞬态流动传热模型的建立

欠平衡钻井过程中,环空中存在钻头破岩产生的岩屑、注入的钻井液和侵入的地层气体,因此,环空内为气-液-固三相流动状态。基于以下假设建立了控制方程:1)沿井筒一维流动;2)处于同一位置的气、液、固三相具有相同的压力和温度;3)忽略不同相之间的传质;4)岩屑对气液两相流型转换准则无影响;5)岩屑在液相中分布均匀,岩屑为球形且大小均匀;6)忽略钻杆运动对多相流特性的影响。

1.1 控制方程

气相、液相和岩屑的质量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho_m \alpha_m A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \alpha_m v_m A)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; α 为相体积分数; v 为速度, m/s ; A 为环空截面积, m^2 ; 下标 $m=g, l, s$, 分别表示气相、液相和岩屑,且三者的相体积分数之和为 1.0 ($\sum \alpha_m = 1.0$)。

气相、液相和岩屑的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho_m \alpha_m v_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \alpha_m v_m^2)}{\partial z} + \frac{\partial(\alpha_m p)}{\partial z} + \alpha_m \rho_m g \cos \theta + F_{wm} + F_{lm} = 0 \quad (2)$$

式中: p 为压力, Pa ; θ 为井斜角, ($^\circ$); g 为重力加速度, m/s^2 ; F_{wm} 为各相壁面剪切应力, Pa/m ; F_{lm} 为各相间的作用力, Pa/m , 并且各相间的作用力之和为 0 ($\sum F_{lm} = 0$)。

对于环空中向上流动的多相流,多相流温度由以下因素决定:1)沿环空向上运移的热量;2)环空流体与钻杆之间的热量交换;3)环空流体与生产套管(套管井段)或地层(裸眼段)之间的热量交换。因此,环空中混合物的能量守恒方程为^[30]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \sum \left[\rho_m \alpha_m \left(u_m + \frac{1}{2} v_m^2 \right) \right] \right\} = \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \sum \left[\rho_m \alpha_m v_m \left(u_m + \frac{p}{\rho_m} + \frac{1}{2} v_m^2 \right) \right] \right\} + \\ & \sum (\rho_m \alpha_m v_m g \cos \theta) + \frac{Q}{A_{an}} + \sum \dot{H}_m \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u 为内能, J/kg; Q 为环空流体与周围环境(包括钻杆和地层)之间的热交换, W/m; A_{an} 为环空截面积, m^2 ; $\dot{H}_m$ 为各相单位体积的流入焓, W/m³。

环空流体与周围环境的换热计算公式为:

$$\begin{aligned} Q = 2\pi r_{dp,o} h_{dp-an} (T_{dp} - T_{an}) + \\ 2\pi r_{ca3,i} h_{an-ca3} (T_{ca3} - T_{an}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $r_{dp,o}$ 为钻杆外壁半径, m; h_{dp-an} 为钻杆与环空流体间的对流换热系数, W/(m²·K); T_{dp} 为钻杆温度, K; T_{an} 为环空流体温度, K; $r_{ca3,i}$ 为生产套管的内半径, m; h_{an-ca3} 为环空流体与生产套管之间的对流换热系数, W/(m²·K); T_{ca3} 为生产套管温度, K。

由于钻杆温度和生产套管温度也随时间和位置变化, 因此需要额外的能量守恒方程来求解环空中混合物的能量守恒方程。钻杆内钻井液温度控制方程为:

$$\begin{aligned} -\rho_d v_d \pi r_{dp,i}^2 c_{p,d} \frac{\partial T_d}{\partial z} + 2\pi r_{dp,i} h_{d-dp} (T_{dp} - T_d) = \\ \rho_d c_{p,d} \pi r_{dp,i}^2 \frac{\partial T_d}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ρ_d 为钻杆内钻井液密度, kg/m³; v_d 为钻杆内钻井液速度, m/s; $c_{p,d}$ 为钻杆内钻井液比热容, J/(kg·K); T_d 为钻杆内钻井液温度, K; $r_{dp,i}$ 为钻杆内半径, m; h_{d-dp} 为钻杆内钻井液与钻杆之间的对流换热系数, W/(m²·K)。

钻杆的温度控制方程为:

$$\begin{aligned} \rho_{dp} c_{p,dp} \pi (r_{dp,o}^2 - r_{dp,i}^2) \frac{\partial T_{dp}}{\partial t} = \lambda_{dp} \pi (r_{dp,o}^2 - r_{dp,i}^2) \frac{\partial^2 T_{dp}}{\partial z^2} + \\ 2\pi r_{dp,i} h_{d-dp} (T_d - T_{dp}) + 2\pi r_{dp,o} h_{dp-an} (T_{an} - T_{dp}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ρ_{dp} 为钻杆密度, kg/m³; $c_{p,dp}$ 为钻杆比热容, J/(kg·K); λ_{dp} 为钻杆导热系数, W/(m·K)。

地层的温度控制方程为:

$$\lambda_f \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} = \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (7)$$

式中: λ_f 为地层导热系数, W/(m·K); T_f 为地层温度, K; $c_{p,f}$ 为地层比热容, J/(kg·K)。

1.2 相间相互作用力

动量守恒方程中, F_{Im} 为各相单位体积承受的相

间力, 它控制着不同相之间的滑移, 并高度依赖于流型。相间作用力包括虚拟质量力和拖曳力。拖曳力是由不同相之间的剪切力引起的; 虚拟质量力是由不同相之间的相对加速度引起的, 通常忽略虚拟质量力项, 以简化计算。

对于泡状流、分散气泡流和段塞流, 液相作用于气相上的拖曳力 F_{Ig} 通常表示为^[31]:

$$F_{Ig} = \frac{1}{8} \rho_l a_{lg} C_{dg} |v_g - v_l| (v_g - v_l) \quad (8)$$

式中: F_{Ig} 为气相拖曳力, N; a_{lg} 为气相的相间面积分数; C_{dg} 为气相的曳力系数。

假设所有流型下, 岩屑在液相中均匀分布, 因此, 液相对岩屑施加的拖曳力 F_{ls} 可表示为:

$$F_{ls} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s}{d_s} \rho_l C_{ds} |v_s - v_l| (v_s - v_l) \quad (9)$$

式中: F_{ls} 为岩屑拖曳力, N; d_s 为岩屑直径, m; C_{ds} 为岩屑的曳力系数。

由于本文液相为牛顿流体, 岩屑均为球形, 因此采用以下经验相关法计算岩屑曳力系数^[32]:

$$C_{ds} = \frac{24}{Re_s} (1 + 0.27 Re_s)^{0.43} + 0.47 \left[1 - \exp(-0.04 Re_s^{0.38}) \right] \quad (10)$$

式中: Re_s 为岩屑雷诺数。

1.3 壁面摩擦力

对于泡状流、分散泡状流和搅拌流, 将环空内气、液、固三相的混合物假设为均相流体来计算壁面摩擦力:

$$\sum F_{Wm} = \frac{f_M \rho_M v_M^2}{4(r_{ca3,i} - r_{dp,o})} \quad (11)$$

式中: f_M 为三相混合物的摩擦系数; 下标 M 表示环空气液固三相混合物。

f_M 是相对粗糙度和雷诺数的函数^[33]:

$$\frac{1}{\sqrt{f_M}} = 4 \lg \left[\frac{\varepsilon}{3.7065 \times 2(r_{ca3,i} - r_{dp,o})} - \frac{5.0425 \lg A^*}{Re_M} \right] \quad (12)$$

式中: Re_M 为环空混合物雷诺数; ε 为壁面绝对粗糙度, m; A^* 为中间参数。

1.4 边界条件

假设钻遇的地层都是含气层, 即没有液体从储层侵入井筒, 因此环空底部的液体质量流速与钻杆入口的液体质量流速相等。

该模型假设侵入气体为甲烷, 根据径向流动方

程^[34] 计算气体流入速率:

$$Q_g = \frac{2.64 \times 10^{-20} K h (p_r^2 - p_b^2)}{(0.8 + \ln t_D) [(T + 18.15) Z \mu_g]} \quad (13)$$

式中: Q_g 为气体体积流量, m^3/s ; p_r 为地层压力, Pa ; p_b 为井底压力, Pa ; K 为地层渗透率, mD ; h 为地层厚度, m ; t_D 为无因次时间。

井底岩屑体积流量的计算公式为:

$$Q_s = \frac{v_{pe}}{3600} \pi r_{ca3,i}^2 \quad (14)$$

式中: Q_s 为岩屑体积流量, m^3/s ; v_{pe} 为机械钻速, m/h 。环空井口压力设定为定值。

2 模型求解及验证

2.1 模型求解

流动方程(质量和动量守恒方程)与能量守恒方程解耦求解^[35]。首先, 利用上一时间步的温度剖面来更新流体性质, 然后求解流动方程, 得到当前时间步的相体积分、相速度和压力; 然后, 利用新的流动参数更新能量守恒方程中的所有系数, 求解整个井筒-地层系统的能量守恒方程, 得到当前时间步的温度分布; 最后, 在流动方程和能量守恒方程之间进行迭代, 直到满足收敛准则。

式(1)和式(2)可以表示为以下形式:

$$\frac{\partial W_j}{\partial t} + \frac{\partial F_j(W_j)}{\partial z} = Q_j(W_j) \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (15)$$

式中: W 、 $F(W)$ 、 $Q(W)$ 为密度、速度、相体积分和压力的函数, 如表 1 所示。

表 1 式(15)中的变量计算公式
Table 1 Variables in Eq. (15)

W_j	$F_j(W_j)$	$Q_j(W_j)$
$W_1 = \rho_g \alpha_g A$	$F_1(W_1) = \rho_g \alpha_g v_g A$	$Q_1(W_1) = 0$
$W_2 = \rho_l \alpha_l A$	$F_2(W_2) = \rho_l \alpha_l v_l A$	$Q_2(W_2) = 0$
$W_3 = \rho_s \alpha_s A$	$F_3(W_3) = \rho_s \alpha_s v_s A$	$Q_3(W_3) = 0$
$W_4 = \rho_g \alpha_g v_g$	$F_4(W_4) = \rho_g \alpha_g v_g^2 + \alpha_g p$ $F_4^*(W_4) = \rho_g \alpha_g v_g^2$	$Q_4(W_4) = -\alpha_g \rho_g g \cos \theta - F_{wg} - F_{lg}$
$W_5 = \rho_l \alpha_l v_l$	$F_5(W_5) = \rho_l \alpha_l v_l^2 + \alpha_l p$ $F_5^*(W_5) = \rho_l \alpha_l v_l^2$	$Q_5(W_5) = -\alpha_l \rho_l g \cos \theta - F_{wl} - F_{ll}$
$W_6 = \rho_s \alpha_s v_s$	$F_6(W_6) = \rho_s \alpha_s v_s^2 + \alpha_s p$ $F_6^*(W_6) = \rho_s \alpha_s v_s^2$	$Q_6(W_6) = -\alpha_s \rho_s g \cos \theta - F_{ws} - F_{ls}$

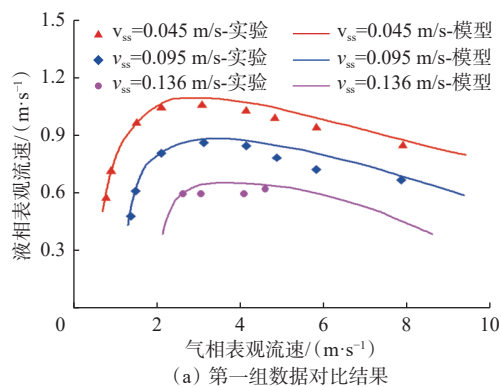
用有限差分法对式(15)进行离散化^[36], 得到如下方程:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{W_j|_{i+1/2}^{n+1} - W_j|_{i+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{F_j(W_j)|_{i+1}^{n+1} - F_j(W_j)|_i^{n+1}}{\Delta z} = \\ & Q_j(W_j)|_{i+1/2}^{n+1/2} \quad (j = 1, 2, 3) \\ & \frac{W_j|_{i+1/2}^{n+1} - W_j|_{i+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{F_j^*(W_j)|_{i+1}^{n+1/2} - F_j^*(W_j)|_i^{n+1/2}}{\Delta z} + \\ & \frac{(\alpha_j p)|_{i+1}^{n+1} - (\alpha_j p)|_i^{n+1}}{\Delta z} = Q_j(W_j)|_{i+1/2}^{n+1/2} \quad (j = 4, 5, 6) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

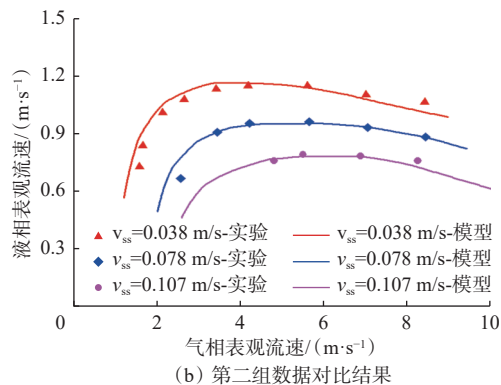
采用有限差分法, 求解整个井筒-地层系统的能量守恒方程。

2.2 模型验证

为了验证所提出的气-液-固三相流动模型的准确性, 将计算结果与实验数据^[37]进行了比较。采用空气和水作为实验工质, 以陶瓷球为固体颗粒。空气的密度由理想气体的状态方程决定。实验过程中, 圆管直径为 0.026 m , 圆管长度为 6.74 m , 固相密度为 2540 kg/m^3 , 岩屑直径为 6.1 mm , 液相密度为 1000 kg/m^3 , 液相黏度为 $1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。计算结果与实测值的对比如图 1 所示。



(a) 第一组数据对比结果



(b) 第二组数据对比结果

图 1 液相速度实测值与模型预测值间的对比

Fig.1 Comparison between measured and predicted liquid velocities

由图1可知,平均相对误差为3.66%,最大误差为16.80%,计算得到的液相速度与实测值吻合较好。此外,还将预测的井筒压力与墨西哥Agave 301井的现场数据进行了比较。Agave 301井的压力计在井深2 259 m处,地表温度为20.85 ℃,氮气注入速率为 $10 \text{ m}^3/\text{min}$,环空回压为0.069 MPa,钻井液密度为 949 kg/m^3 ,钻井液黏度为 $10.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,机械钻速为 3.0 m/h ,地温梯度为 $1.745 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,钻井液注入速率为 $0.45 \text{ m}^3/\text{min}$,钻杆和环空压力的预测与现场测量的平均相对误差为1.76%和1.29%(见图2)。

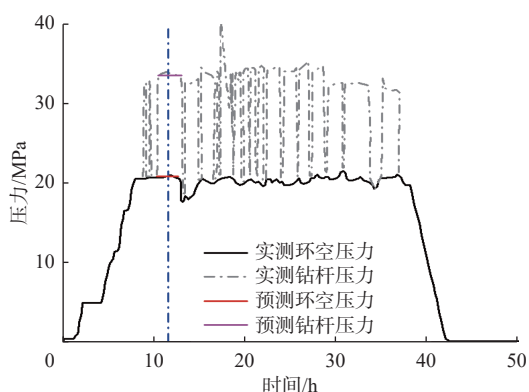


图2 Agave 301井实测压力与预测压力比较

Fig.2 Comparison between measured and predicted pressure of Well Agave 301

3 井筒多相流动特性影响因素分析

研究了岩屑及井筒与地层间对流换热对井筒流动传热特性的影响,利用控制变量法,分析了敏感性参数(欠平衡压差、机械钻速、地温梯度)的影响规律。模拟井的井深为7 000 m,钻杆内径为70.2 mm,钻杆外径为88.9 mm,钻头直径为152.4 mm,液相质量流量为 9.0 kg/s ,地层渗透率为60 mD,地层孔隙度为50%,地层厚度为50 m,地表温度为25 ℃,钻井液注入温度为10 ℃,液体黏度为 $10.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,节流阀压力为1.0 MPa,岩屑密度为 $2 650 \text{ kg/m}^3$,液相注入压力为11.5 MPa。

3.1 岩屑

以前的欠平衡钻井模型,通常忽略岩屑的影响,而岩屑影响井筒中的压力分布,进而影响井筒多相流动特性。基于本文所建立的模型,比较了模型中考虑和不考虑岩屑存在时环空多相流动特性差异。欠平衡压差和地温梯度分别设定为1.0 MPa和 $2.0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。计算中考虑岩屑影响时,岩屑直径和

机械钻速分别设为2.5 mm和15 m/h。考虑和不考虑岩屑存在时,利用所建模型计算出的井底压力曲线、岩屑体积分数/岩屑重力压降、气体侵入速率/气体侵入总质量、气相体积分数剖面如图3所示。从图3(a)可以看出,不考虑岩屑时,井底压力被低估了约2 MPa,60 000 s时,有岩屑存在时为57.043 MPa,无岩屑存在时为55.041 MPa,2种工况下的井底压力差为2.002 MPa,相对误差为3.64%。分析认为其原因是:首先,岩屑的存在增加了环空中混合物的重力压降,如60 000 s时井筒底部岩屑重力压降为1.219 MPa(见图3(b))。其次,由于井底压力升高,环空底部与储层之间的压差减小,从储层侵入井筒气体的速率减小,考虑和不考虑岩屑存在时,60 000 s时储层侵入井筒气体的速率分别为 1.018 kg/s 和 1.137 kg/s (见图3(c));从储层侵入井筒的气体越少,井底压力降低程度越小。此外,井筒压力升高会使气体密度升高,从而进一步降低环空中的气相体积分数;考虑和不考虑岩屑存在时,60 000 s沿井筒的最大气体分数差为0.031 6(见图3(d))。

3.2 井筒-地层传热

井筒与地层间的传热影响井筒温度场,进而影响井筒中流体性质,最终影响井筒多相流动特性。为此,比较了考虑与不考虑井筒-地层间对流换热时的环空多相流动特性。欠平衡压差为1.0 MPa,岩屑直径为2.5 mm,机械钻速为15 m/h,地温梯度为 $2.0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。在不考虑环空流体与周围环境之间换热的情况下,利用所建模型计算考虑与不考虑井筒-地层对流换热时的井底压力、温度、气体密度和岩屑体积分数,结果见图4。计算时将环空流体温度设为常数,并采用了2种环空流体温度分布方式:1)环空流体温度等于钻井液注入温度(条件1);2)随着井深的增加,环空流体温度从钻井液注入温度开始,随着地温梯度增大而升高。

从图4(a)可以看出,不考虑井筒-地层对流换热时,井底压力被高估了。在100 000 s时,考虑对流换热、条件1和条件2等3种条件下的井底压力分别为56.996, 61.932和57.694 MPa。不考虑换热效应时井底压力的相对误差分别为8.66%和1.21%。图4(b)为不同工况下环空流体温度分布。考虑传热效应的情况下,环空流体温度随时间推移而升高。考虑换热效应、条件1和条件2等3种条件下,在100 000 s时,考虑换热效应的环空流体温度均大于条件1,而其先大于后小于条件2;与考虑换热效应的计算结果相比,条件1和条件2的最大

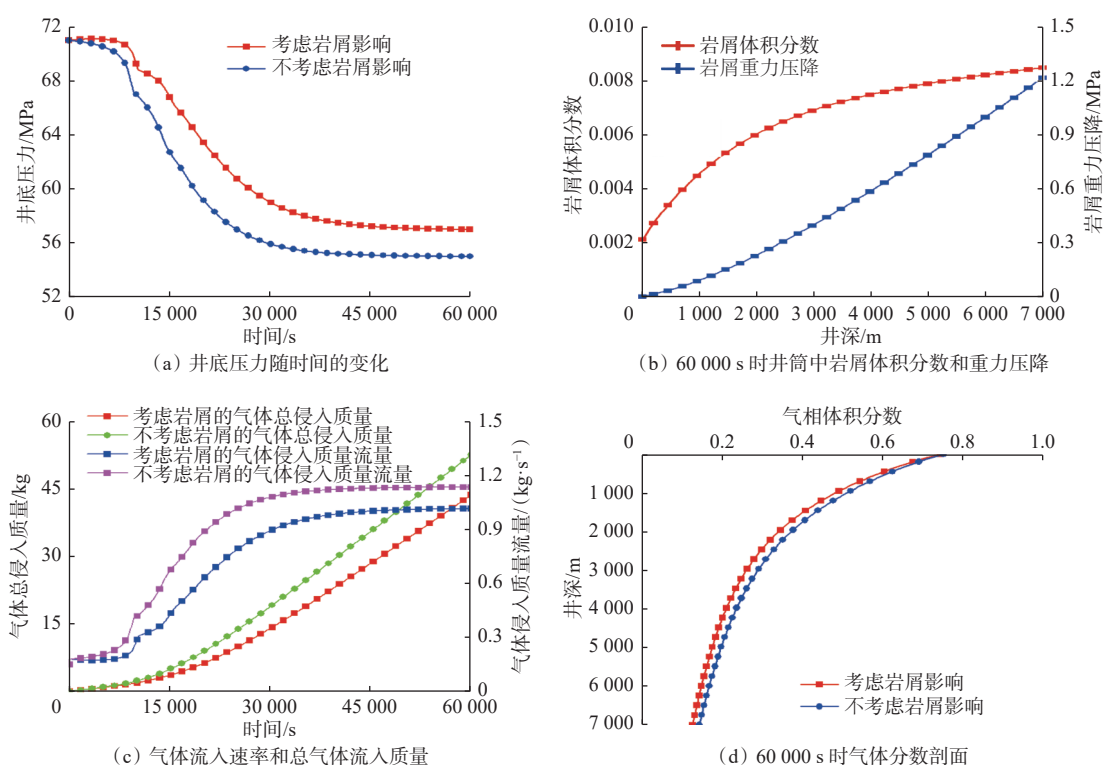


图 3 考虑与不考虑岩屑时井底压力、岩屑体积分数/重力压降、气体流入速率/质量和气体分数剖面

Fig.3 BHP, cuttings fraction/hydrostatic pressure, gas influx rate/mass, and gas fraction profile with and without considering cuttings

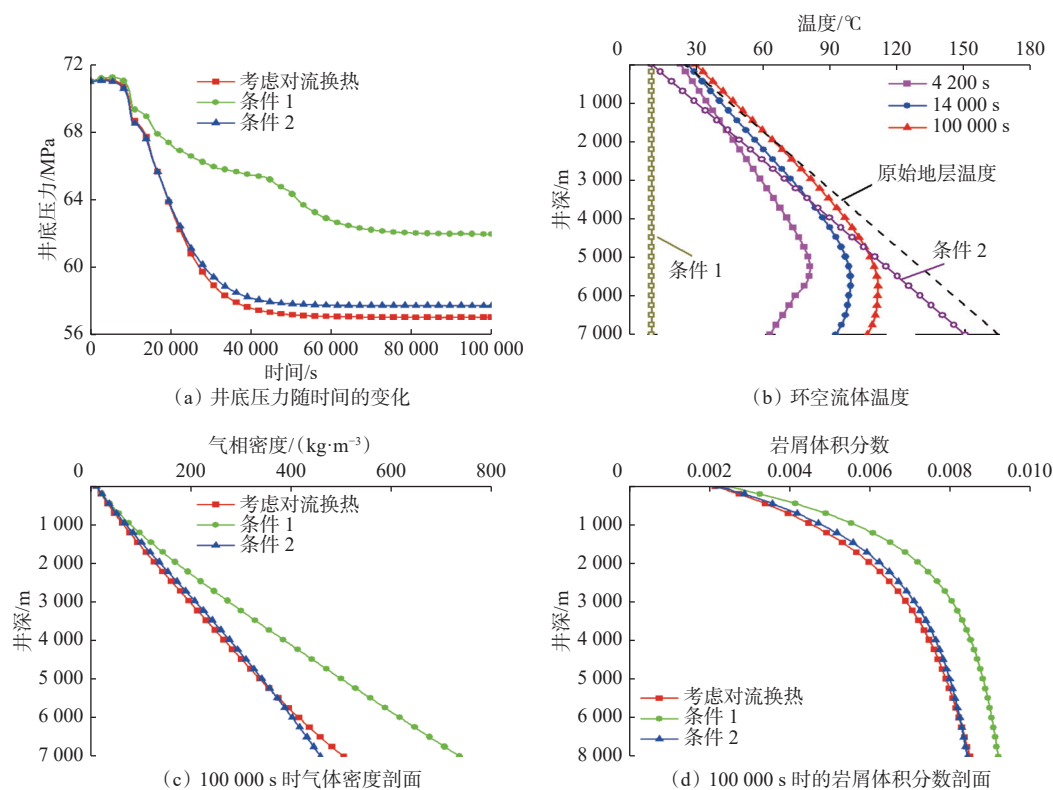


图 4 考虑与不考虑换热效应时的井底压力、环空流体温度、气体密度和岩屑体积分分数分布曲线

Fig.4 BHP, annulus fluid temperature, gas density, and cuttings fraction distribution curve with and without considering heat transfer effects

温差分别为 101.12 和 43.67 °C。环空流体温度不同也会使气体密度等沿井筒流体性质的不同,从而使井筒压力也不同(见图 4(c));在不考虑换热效应的情况下,井筒岩屑体积分数被高估(见图 4(d))。

3.3 欠平衡压差

欠平衡压差影响气相进入井筒中的速率,进而影响井筒多相流动特性。岩屑直径为 2.5 mm,机械钻速为 15 m/h,地温梯度为 2.0 °C/100m,欠平衡压差分别为 0.5, 1.0 和 1.5 MPa,利用所建模型分别计算得到井筒压力随井深变化剖面和气体侵入速率随时间的变化,结果见图 5。从图 5 可以看出,随着欠平衡压差增大,井筒压力升高。在 60 000 s 时,欠平衡压差为 0.5, 1.0 和 1.5 MPa 时的井底压力分别为 60.790, 57.044 和 54.136 MPa,这主要是因为气体侵入速率随着欠平衡压差增大而升高(见图 5(b))。

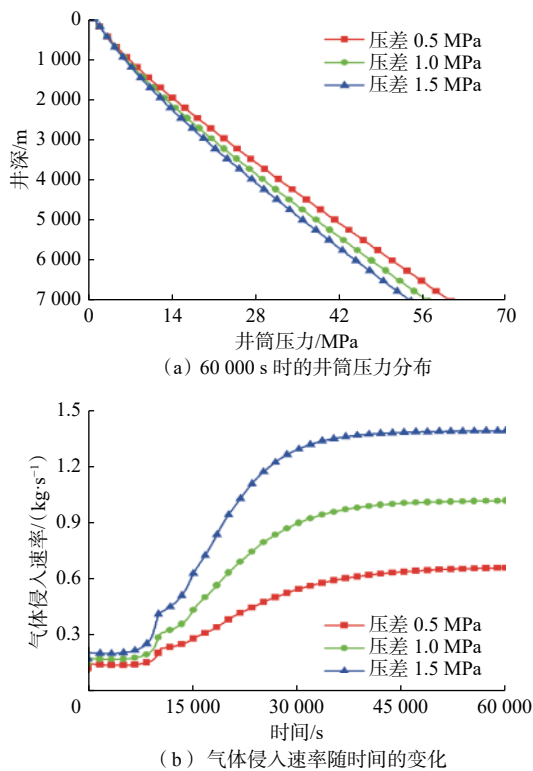


图 5 不同欠平衡压差下井筒压力分布及气体侵入速率随时间的变化曲线

Fig.5 Variation curve of wellbore pressure distribution and gas influx rate with time under different under-balanced pressure difference

不同欠平衡压差条件下,利用所建模型分别计算得到 9 520 和 60 000 s 时气相体积分数随深度的变化关系,结果见图 6。从图 6 可以看出,由于气体流入速率较高,沿井筒的气体分数随欠平衡压差增大而增大;60 000 s 时,欠平衡压差为 0.5 MPa 与 1.0 MPa

和 1.0 MPa 与 1.5 MPa 的最大气相体积分数差分别为 0.108 0 和 0.076 6。从图 6(a)可以看出,由于气体速度较大,随着欠平衡压差增大,气相到达地面的时间会更早。

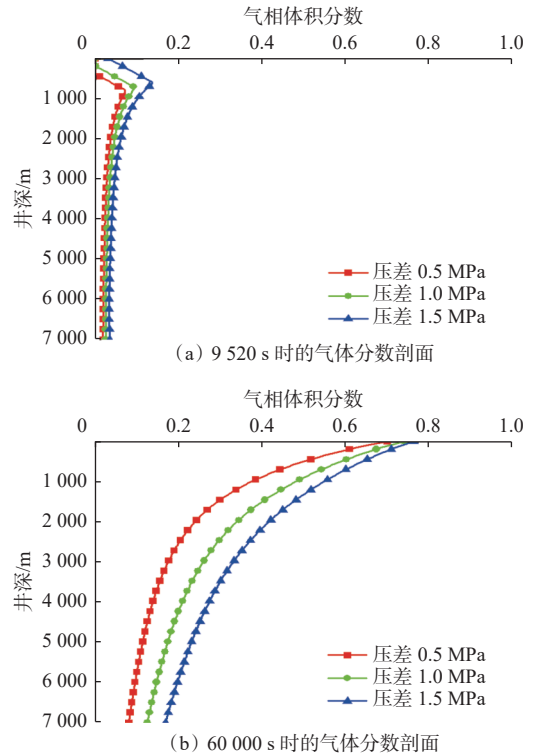


图 6 不同欠平衡压差下的气相体积分数分布曲线

Fig.6 Gas fraction distribution curve under different under-balanced pressure differences

3.4 机械钻速

机械钻速影响岩屑进入井筒的速率,因此分析机械钻速对井筒多相流动特性影响规律。在欠平衡压差 1.0 MPa、岩屑直径 2.5 mm、地温梯度 2.0 °C/100m,机械钻速分别为 10, 15 和 20 m/h 的条件下,利用所建模型计算井底压力随时间的变化,结果见图 7。

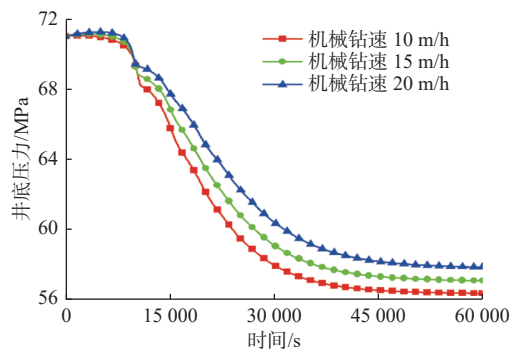


图 7 不同机械钻速下井底压力随时间的变化曲线

Fig.7 Changes curve of BHP with time under different ROPs

从图 7 可以看出, 井筒压力随着机械钻速增大而升高。60 000 s 时, 机械钻速为 10、15 和 20 m/h 时的井底压力分别为 56.320、57.044 和 57.811 MPa。这是因为机械钻速越大, 环空混合物的静液柱压力也越大。

绘制不同机械钻速下环空流体温度分布曲线, 结果如图 8 所示。由图 8 可以看出, 空流体温度随着机械钻速增大而升高。随着机械钻速增大, 环空中的岩屑体积分数也随之增大。由于岩屑比热容小于液相和气相比热容, 环空流体的比热容随着岩屑体积分数增大而减小。因此, 由于混合物的比热容较小, 环空流体温度随着机械钻速增大而升高。

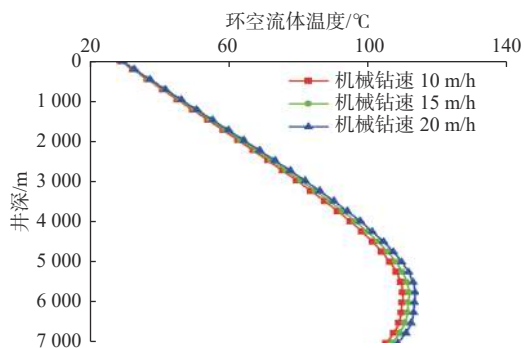


图 8 60 000 s 时不同机械钻速下的环空流体温度分布曲线
Fig.8 Annulus fluid temperature distribution curve under different ROP at 60 000 s

3.5 地温梯度

地温梯度是影响井筒温度的重要因素。在欠平衡压差 1.0 MPa, 岩屑直径 2.5 mm, 机械钻速 15 m/h, 地温梯度分别为 1.0、2.0 和 3.0 °C/100m 的条件下, 利用所建模型计算 60 000 s 时的环空流体温度分布, 结果见图 9。从图 9 可以看出, 环空流体温度随着地温梯度增大而升高。这是因为随着地温梯度增大, 环空流体与周围环境的温差增大, 可以从周围环境吸收更多的热量。此外, 环空流体的最高温度并不出现在井底。这种情况下, 环空流体最高温度出现在井深 5 795 m 处, 是井底以上井深的六分之一。这种现象的原因可以从环空流体与周围环境的热交换来解释: 首先, 钻杆中的钻井液吸收环空流体的热量, 其温度在井底达到最高; 然后, 钻井液随岩屑和侵入气体沿环空向上流动, 由于环空中混合物的温度低于地层温度, 混合物继续从地层中吸收热量; 在环空下部, 从储层吸收的热量大于钻杆流体损失的热量, 因此环空流体温度升高; 当环空流体的净换热为零时, 环空流体温度达到最高。

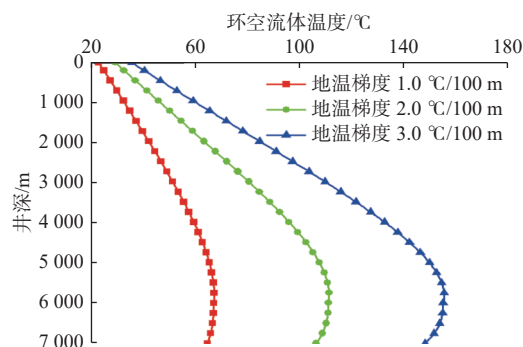
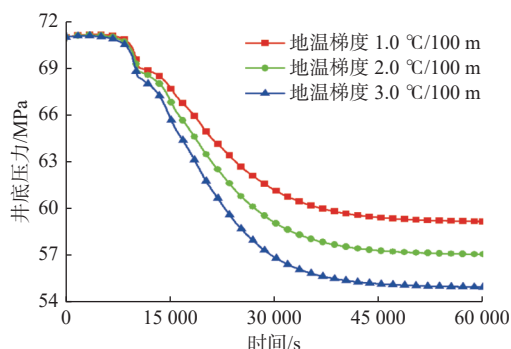


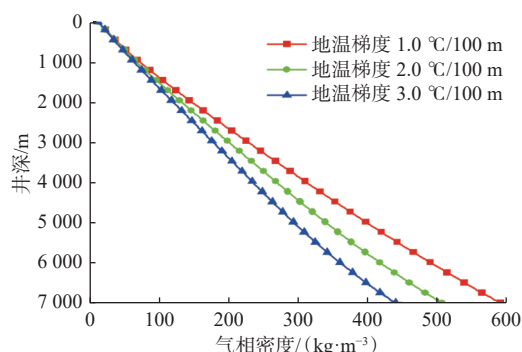
图 9 60 000 s 时不同地温梯度下的环空流体温度分布曲线

Fig.9 Annulus fluid temperature distribution curve under different geothermal gradients at 60 000 s

绘制不同地温梯度下井底压力随时间变化的曲线和气相密度随深度的变化曲线, 如图 10 所示。从图 10 可以发现, 地温梯度增大会导致沿井筒气体的密度降低, 从而导致井底压力降低。



(a) 井底压力随时间的变化



(b) 60 000 s 时的气体密度剖面

图 10 不同地温梯度下的井底压力和气体密度分布曲线

Fig.10 BHP and gas density distribution curve profiles under different geothermal gradients

综合上述研究结果可以看出, 考虑岩屑影响时, 井筒中的气体侵入速率和气相体积分数都会相应降低; 不考虑井筒-地层对流换热时, 井筒压力会被高估。随着机械钻速增大, 井筒压力、井筒温度

和岩屑体积分数都会相应增大;且随着机械钻速增大,欠平衡钻井过程中气相和岩屑到达地面的时间会更早。

4 结 论

1)针对深层页岩欠平衡钻井过程,建立了井筒内气-液-固三相瞬态流动传热模型;与欠平衡钻井作业的现场数据进行了对比验证,验证了模型的可靠性和准确性。

2)欠平衡钻井过程中不考虑岩屑影响时,井底压力被低估。这是因为岩屑会产生额外的岩屑重力压降,使井底压力升高,从而导致侵入气体速率减小,并且进一步降低环空中的气相体积分数。

3)欠平衡钻井过程中不考虑井筒-地层对流换热影响时,井底压力被高估,因此需要准确预测井筒温度场及其对井筒流体性质和压力分布的影响。

4)本文所建立的气-液-固三相流动模型拓展了传统的气-液两相流动模型,为页岩欠平衡钻井过程中井筒压力准确预测和高效调控提供了理论基础。

参 考 文 献

References

- [1] 李涛,杨哲,徐卫强,等. 泸州区块深层页岩气水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 16-21.
LI Tao, YANG Zhe, XU Weiqiang, et al. Optimized and fast drilling technology for deep shale gas horizontal wells in Luzhou Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 16-21.
- [2] 胡云锋,代一钦. 降密度控压欠平衡钻井技术在页岩气井中的应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(29): 75-78.
HU Yunfeng, DAI Yiqin. Application of lower density and control of underbalanced formation pressure in shale gas wells[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2015, 12(29): 75-78.
- [3] 胡挺,张志磊,王云华,等. 阳平1井致密性孔隙-裂缝型气藏欠平衡钻井技术剖析[J]. 新疆石油天然气, 2020, 16(4): 33-36.
HU Ting, ZHANG Zhilei, WANG Yunhua, et al. Analysis of underbalanced drilling and completion technology for tight-pore fractured gas reservoir-Well Yang Ping1[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2020, 16(4): 33-36.
- [4] 李玉海,李博,柳长鹏,等. 大庆油田页岩油水平井钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 9-13.
LI Yuhai, LI Bo, LIU Changpeng, et al. ROP improvement technology for horizontal shale oil wells in Daqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 9-13.
- [5] 姜政华,孙钢,陈士奎,等. 南川页岩气田超长水平段水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 20-26.
JIANG Zhenghua, SUN Gang, CHEN Shikui, et al. Key drilling technologies for horizontal wells with ultra-long horizontal sections in Nanchuan Shale Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 20-26.
- [6] 石崇东,王万庆,史配铭,等. 盐池区块深层页岩气水平井钻井关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 23-28.
SHI Chongdong, WANG Wanqing, SHI Peiming, et al. Research on key drilling technology for horizontal wells in the deep shale gas reservoirs in Yanchi Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(6): 23-28.
- [7] 车卫勤,许雅潇,岳小同,等. 渝西大足区块超深超长页岩气水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(4): 408-414.
CHE Weiqin, XU Yaxiao, YUE Xiaotong, et al. Drilling technology of ultra-deep ultra-long shale gas horizontal wells in Dazu, West Chongqing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(4): 408-414.
- [8] 谭宾. 四川盆地南部地区深层页岩气工程关键技术与展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 212-219.
TAN Bin. Key technologies and prospects of deep shale gas engineering in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(8): 212-219.
- [9] FALAVAND-JOZAEI A, HAJIDAVALLOO E, SHEKARI Y, 等. 基于非等温三相模型的欠平衡钻井井底压力预测[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 358-365.
FALAVAND-JOZAEI A, HAJIDAVALLOO E, SHEKARI Y, et al. Modeling and simulation of non-isothermal three-phase flow for accurate prediction in underbalanced drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 358-365.
- [10] 吴萌,王玺,杨国彬. MPD技术在印尼基岩地层微欠平衡钻井实践[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 8-10.
WU Meng, WANG Xi, YANG Guobin. Practice of MPD technology in micro-underbalanced drilling in bed rock in Indonesia[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(2): 8-10.
- [11] 胡清富,谢春来,田玉栋,等. 伊拉克库尔德A油田原油注氮欠平衡钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 32-36.
HU Qingfu, XIE Chunlai, TIAN Yudong, et al. Under-balanced drilling technique using nitrogen injection into crude oil in Oilfield A of Iraq Kurdistan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 32-36.
- [12] 高如军,唐国军,李洪玺. 充气欠平衡钻井技术在低压漏失井的应用[J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 16-18.
GAO Rujun, TANG Guojun, LI Hongxi. Application of aerated UBD in low-pressure lost-circulation well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(3): 16-18.
- [13] 李科,贾江鸿,于雷,等. 页岩油钻井漏失机理及防漏堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(4): 446-450.
LI Ke, JIA Jianghong, YU Lei, et al. Mechanisms of lost circulation and technologies for mud loss prevention and control in shale oil drilling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(4): 446-450.
- [14] 陈更生,吴建发,刘勇,等. 川南地区百亿立方米页岩气产能建设地质工程一体化关键技术[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 72-82.
CHEN Gengsheng, WU Jianfa, LIU Yong, et al. Geology-engineering integration key technologies for ten billion cubic meters of shale gas productivity construction in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 72-82.
- [15] 谢金波,王安成,罗世祥. 煤层气洞穴充气欠平衡钻井井底压力的研究[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 31-34.

- XIE Jinbo, WANG Ancheng, LUO Shixiang. Research on bottom hole pressure of cave aerated underbalanced drilling in coalbed gas reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(4): 31–34.
- [16] LI Hongtao, LIANG Jie, LI Chengxiao, et al. A novel method to improve mud pulse telemetry performance during gaseated underbalanced drilling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213: 110400.
- [17] AL-DARWEESH J, ALJAWAD M S, AL-RAMADAN M, et al. Review of underbalanced drilling techniques highlighting the advancement of foamed drilling fluids[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2023, 13(4): 929–958.
- [18] LAGE A C V M, FJELDE K K, TIME R W. Underbalanced drilling dynamics: two-phase flow modeling and experiments[J]. *SPE Journal*, 2003, 8(1): 61–70.
- [19] PEDERSEN T, GODHAVN J M. Linear multivariable control of underbalanced-drilling operations[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2017, 32(4): 301–311.
- [20] OZBAYOGLU E M. Optimization of liquid and gas flow rates for aerated drilling fluids considering hole cleaning for vertical and low inclination wells[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2010, 49(10): 15–24.
- [21] VEFRING E H, NYGAARD G, LORENTZEN R J, et al. Reservoir characterization during underbalanced drilling (UBD): methodology and active tests[J]. *SPE Journal*, 2006, 11(2): 181–192.
- [22] HE Miao, ZHANG Yihang, XU Mingbiao, et al. Real-time interpretation model of reservoir characteristics while underbalanced drilling based on UKF[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8967961.
- [23] GUO Boyun, HARELAND G, RAJTAR J. Computer simulation predicts unfavorable mud rate and optimum air injection rate for aerated mud drilling[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1996, 11(2): 61–66.
- [24] UDEGBUNAM J E, FJELDE K K, EVJE S, et al. On the advection-upstream-splitting-method hybrid scheme: a simple transient-flow model for managed-pressure-drilling and underbalanced-drilling applications[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2015, 30(2): 98–109.
- [25] KHEZRIAN M, HAJIDAVALLOO E, SHEKARI Y. Modeling and simulation of under-balanced drilling operation using two-fluid model of two-phase flow[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 93: 30–37.
- [26] ZHANG Wei, MAO Xinjun, YANG Hong, et al. Innovative application of underbalanced drilling technology for deep drilling in Wuxia Area of Junggar Basin[R]. SPE 156258, 2012.
- [27] TENG Xueqing, YANG Pei, LI Ning, et al. The first application of whole process underbalanced drilling in ultradeep horizontal well in Tarim Oilfield[R]. SPE 168954, 2014.
- [28] SONG Xuncheng, GUAN Zhichuan. Coupled modeling circulating temperature and pressure of gas–liquid two phase flow in deep water wells[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 92/93: 124–131.
- [29] ABDELGHANY W K, RADWAN A E, ELKHAWAGA M A, et al. Geomechanical modeling using the depth-of-damage approach to achieve successful underbalanced drilling in the Gulf of Suez rift basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 202: 108311.
- [30] SHIRDEL M, SEPEHRNOORI K. Development of transient mechanistic three-phase flow model for wellbores[J]. *SPE Journal*, 2017, 22(1): 374–388.
- [31] BROOKS C S, HIBIKI T, ISHII M. Interfacial drag force in one-dimensional two-fluid model[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2012, 61: 57–68.
- [32] XU Zhengming, SONG Xianzhi, LI Gensheng, et al. Predicting fiber drag coefficient and settling velocity of sphere in fiber containing Newtonian fluids[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 159: 409–418.
- [33] CHEN N H. An explicit equation for friction factor in pipe[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1979, 18(3): 296–297.
- [34] NICKENS H V. A dynamic computer model of a kicking well[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1987, 2(2): 159–173.
- [35] XU Zhengming, SONG Xianzhi, LI Gensheng, et al. Development of a transient non-isothermal two-phase flow model for gas kick simulation in HTHP deep well drilling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1055–1069.
- [36] AVELAR C S, RIBEIRO P R, SEPEHRNOORI K. Deepwater gas kick simulation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 67(1/2): 13–22.
- [37] YOSHINAGA T, SATO Y. Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(2): 223–238.

[编辑 滕春鸣]