

引文：孙晓峰, 姚笛, 孙士慧, 等. 基于漂移流动模型的水平井岩屑床高度瞬态计算新方法 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 85-92.
SUN Xiaofeng, YAO Di, SUN Shihui, et al. A new transient calculation method of cuttings bed thickness based on drift flow model[J].
Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 85-92.

基于漂移流动模型的水平井岩屑床高度瞬态计算新方法

孙晓峰^{1,2} 姚笛¹ 孙士慧¹ 纪国栋³ 于福锐¹ 孙铭浩¹ 赵元喆¹ 陶亮¹

1. “提高油气采收率”教育部重点实验室·东北石油大学 2. 东北石油大学三亚海洋油气研究院

3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司

摘要：水平井已成为常规和非常规油气资源开采的常用井型，但水平井钻井过程中造斜段与水平段环空极易堆积形成岩屑床，为避免岩屑床沉积所导致的埋钻、卡钻事故，需要对环空中的岩屑床高度进行实时准确预测。为此，基于漂移流动模型建立了环空固液两相瞬态运移模型，应用基于交错网格的有限体积法对环空进行离散化，并采用投影方法进行数值求解。研究结果表明：①投影方法可以应用于环空固液两相瞬态计算当中，且求解效率高于传统的压力—速度耦合算法；②岩屑进入环空后，首先在钻头处形成稳定岩屑床并逐渐向出口方向延伸，由于岩屑运移所产生的阻力远高于钻井液流动阻力，岩屑体积分数较高的井段环空压耗大幅增加；③环空中形成稳定岩屑床的时间主要受排量影响，低环空排量形成稳定岩屑床的时间较高环空排量所需时间更长；④通过与稳态岩屑床高度模型进行对比，所建立模型可满足实钻过程中的工程需要，且准确性可靠。结论认为，建立的模型用于预测大斜度井段岩屑床瞬态高度，计算效率较高，能够为水平井岩屑床高效清除与卡钻事故风险预测提供一定的理论指导。

关键词：固液两相流动；水平井；岩屑床高度；岩屑运移；投影方法；漂移流动模型；不可压缩流动

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.05.009

A new transient calculation method of cuttings bed thickness based on drift flow model

SUN Xiaofeng^{1,2}, YAO Di¹, SUN Shihui¹, JI Guodong³, YU Furui¹, SUN Minghao¹, ZHAO Yuanzhe¹, TAO Liang¹

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Ministry of Education//Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Sanya Offshore Oil & Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya, Hainan 572025, China; 3. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing, 102206, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.5, p.85-92, 5/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Horizontal wells have already been a common well type for the production of conventional and unconventional oil and gas resources, but in the drilling process, cuttings accumulate to form cuttings bed easily in the annulus of deflection sections and horizontal sections. In order to avoid pipe burying and sticking accidents caused by the deposition of cuttings bed, it is necessary to accurately predict the thickness of the cuttings bed in the annulus in real time. In this paper, a transient migration model of solid-liquid two-phase flow in the annulus is established based on the drift flow model, and the annulus is discretized by using the finite volume method based on staggered grids, and it is numerically solved by means of projection. And the following research results are obtained. First, the projection method can be applied to the transient calculation of solid-liquid two-phase flow in the annulus, and its solution efficiency is higher than that of traditional pressure-velocity coupling algorithm. Second, after the cuttings flow into the annulus, a stable cuttings bed is firstly formed at the bit and then gradually extends to the outlet. Since the resistance generated by cuttings migration is much higher than the flow resistance of drilling fluid, the annulus pressure loss in the well section with higher cuttings volume fraction increases significantly. Third, the time to form a stable cuttings bed in the annulus is mainly affected by the displacement, and the time to form a stable cuttings bed at a low annular displacement is longer than that at a higher annular displacement. Fourth, it is verified by comparing with the steady-state cuttings bed thickness model that this new model is accurate and reliable enough to meet the engineering needs in the process of actual drilling. In conclusion, the proposed model has high calculation efficiency and can be used to predict the transient thickness of cuttings bed in highly deviated well sections. The research results can provide a certain theoretical guidance for the efficient removal of a cuttings bed and the risk prediction of pipe sticking accidents in horizontal wells.

Keywords: Solid-liquid two-phase flow; Horizontal well; Cuttings bed thickness; Cuttings migration; Projection method; Drift flow model; Incompressible flow

基金项目：国家自然科学基金面上项目“基于环空固液两相瞬态流动特性研究页岩气水平井卡钻事故的诱发机制”（编号：52174002）、国家自然科学基金青年科学基金项目“页岩气藏 CO₂ 干法压裂相态控制机理研究”（编号：52004064）。

作者简介：孙晓峰，1980 年生，教授，博士研究生导师，博士；主要从事油气井流体力学与井眼清洁研究工作。地址：（163318）黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 199 号。ORCID: 0000-0003-1117-8341。E-mail: suneye@126.com

通信作者：姚笛，1994 年生，博士研究生；主要从事油气井流体力学与应用方面研究工作。地址：（163318）黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 199 号。E-mail: ydi_nepu@163.com

0 引言

目前,水平井已是油气资源开采的常用井型,但钻井过程中岩屑极易在造斜段和水平段沉降形成岩屑床,从而引发钻具高摩阻,高扭矩、钻头托压、卡钻等一系列问题^[1-6]。因此,有必要深入研究大斜度与水平井段的运移规律,建立瞬态岩屑运移模型对岩屑成床与运移规律进行描述,从而准确预测井眼环空内岩屑的分布情况。

现有国内外学者所建立的岩屑瞬态运移模型主要以岩屑床高度预测分层模型为主,包括两层岩屑运移模型与三层岩屑运移模型^[7-13]。Martins 等^[14]以两层岩屑稳态运移模型为基础,首次建立了时间相关的两层岩屑瞬态模型。Wang 等^[15]等提出了基于 SETS 方法的三层瞬态模型求解方法。Zhang 等^[16]基于环空固液两相流流型建立了一种动态岩屑床分层预测模型,模型的层数可由流型确定。Guo 等^[17]将三层稳态模型与两层非稳态模型相结合,建立了三层瞬态运移模型。Fallah 等^[18]提出了基于漂移模型的两层岩屑瞬态模型。

就目前的研究来看,岩屑分层运移模型虽然可以计算岩屑瞬态沉积高度,但模型求解速度慢,耗费计算资源,且仅在没有扰动时适用。在大斜度与水平井段钻进过程中,钻杆旋转、震动与起下均是流动中的大扰动,钻井液与岩屑的固液两相流存在沙丘流、分层流、分散悬浮等多种流型,此时岩屑分层模型并不适用。因此,本文不对环空中的固液两相流动进行区域划分,将环空中的钻井液与岩屑视为一个整体,仅考虑相间的滑移作用,应用漂移流动模型建立一维环空固液两相流动瞬态计算模型,采用有限体积法对井眼环空空间进行离散,离散后应用投影法进行求解。解得各项流动参数后再通过井斜角、岩屑床孔隙度等判别条件计算大斜度井段岩屑床的高度。以期为水平井的岩屑床清除提供指导,提高水平井井眼清洁效率。

1 环空固液两相流瞬态流动模型

在水平井钻进过程中,岩屑以一恒定的体积浓度进入环空中。流入环空的岩屑与钻井液混合,形成混合流体不断向井口运移^[19],如图 1 所示。笔者使用漂移流动模型对环空钻井液—岩屑的两相流流动进行模拟,漂移流动模型最早由 Zuber 等^[20]提出,模型将混合流动的两相流体看作一种流体,忽略相

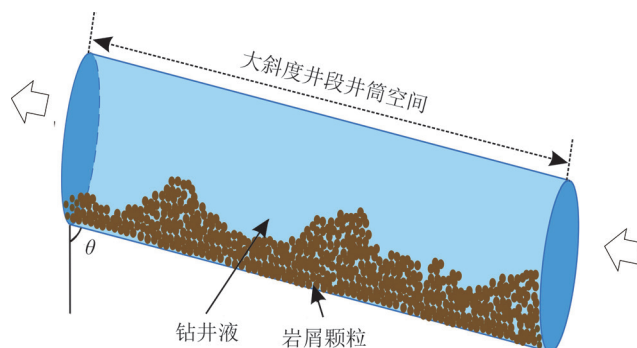


图 1 井筒环空固液两相流动示意图

间的质量传递与能量传递,考虑相间的滑移速度关系^[21-22]。笔者应用 Walton^[23]所建立的固液两相漂移速度关系,构建井眼环空固液两相流瞬态流动模型。

1.1 基本假设

环空固液两相流瞬态流动模型的基本假设如下: ①固液两相在环空中的流动是一维的,各相流动参数保存在井筒网格节点,且在同一时间步时间内流动参数值保持恒定。②模型不考虑环空中的温度变化,且在流动过程中钻井液与岩屑均不可压缩,岩屑颗粒均为均匀球型颗粒,具有相同的粒径。③岩屑颗粒在小斜度井段(井斜角小于等于 30°)与直井段中始终保持均匀分散状态,在井斜角大于 30°的井段中会沉积形成岩屑床层。④假设模型计算得到的固相岩屑全部沉积形成岩屑床,则可通过岩屑床孔隙度将岩屑床体积分数转化为无因次岩屑床高度,本文中假设岩屑床孔隙度为 52%。

1.2 控制方程

钻井液与岩屑的连续性方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_l \rho_l u_l) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_s \rho_s u_s) = 0 \quad (2)$$

钻井液与岩屑的混合动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l u_l + \alpha_s \rho_s u_s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l \alpha_l u_l^2 + \rho_s \alpha_s u_s^2 + p) = -q \quad (3)$$

式中 α_l 、 α_s 分别表示液相、固相体积分数,无量纲; ρ_l 、 ρ_s 分别表示液相、固相密度, kg/m^3 ; u_l 、 u_s 分别表示液相、固相速度, m/s ; p 表示压力, Pa ; q 表示源项。源项考虑了质量力与钻井液流变性等外界因素对流动的影响,包含重力项与阻力项两部分,其表达式为:

$$q = F_g + F_f = g(\rho_l \alpha_l + \rho_s \alpha_s) \cos \theta + \frac{2f \rho_m u_m^2}{d_o - d_i} \quad (4)$$

式中 F_g 、 F_f 分别表示重力分量、阻力分量, Pa/m ;

θ 表示井斜角, ($^{\circ}$); g 表示重力加速度, m/s^2 ; d_o 、 d_i 分别表示钻杆外径、井眼内径, m ; f 表示范宁摩擦系数, 无量纲; ρ_m 表示固液相混合密度, kg/m^3 ; u_m 表示固液相混合速度, m/s 。

固液相混合密度与混合速度的表达式分别为:

$$\rho_m = \alpha_s \rho_s + \alpha_l \rho_l \quad (5)$$

$$u_m = \frac{\alpha_s u_s \rho_s + \alpha_l u_l \rho_l}{\rho_m} \quad (6)$$

固相体积分数与液相体积分数之间的关系满足:

$$\alpha_s + \alpha_l = 1 \quad (7)$$

1.3 漂移速度模型

考虑岩屑与钻井液之间的滑移关系, 固相与液相间的漂移速度关系为:

$$u_s = cu_m - u_{\text{slide}} \quad (8)$$

其中

$$u_{\text{slide}} = u_p \cos \theta \quad (9)$$

式中 u_{slide} 表示相间滑移速度, m/s ; u_p 表示岩屑沉降速度, m/s ; c 表示相间分布系数, 无量纲。相间分布系数 c 表示速度与浓度分布的不均匀度, 受井斜角、钻杆转速、钻井液密度、流型等多种因素影响, 通常由实验获得。

岩屑在幂律流体中的沉降速度 u_p 表达式为^[24]:

$$u_p = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{gd_s}{C_d} \times \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} \quad (10)$$

其中阻力系数的表达式为:

$$C_d = \frac{24}{Re_s} (1 + 0.12 Re_s)^{0.35} + 0.398 [1 - \exp(-0.01 Re_s^{0.9282})] \quad (11)$$

颗粒雷诺数与沉降速度的关系为:

$$Re_s = \frac{\rho_l u_p^{2-n} d_s^n}{K} \quad (12)$$

式中 d_s 表示岩屑颗粒的当量直径, m ; C_d 表示岩屑颗粒在钻井液中的阻力系数, 无量纲; Re_s 表示岩屑的颗粒雷诺数, 无量纲。

2 模型求解方法

2.1 离散格式

由于水平井井筒的轴向尺寸远大于径向尺寸, 不考虑管柱偏心问题, 可以将三维空间井筒简化为沿井筒轴向方向的一维空间, 并对井筒一维空间均匀划分。由于本文所研究的钻井液与岩屑的固液两相流是标准的不可压缩流动, 为避免出现奇偶失联

型压力场影响计算精度, 选用基于交错网格的有限体积法对井筒空间进行离散, 将井筒空间分为一系列控制体, 对控制体单元进行质量与动量守恒分析, 离散后的井筒网格如图2所示, 交错网格将标量储存在控制体中心, 速度参数储存在控制体边界。边界处的固相体积分数与液相体积分数可通过插值获得。

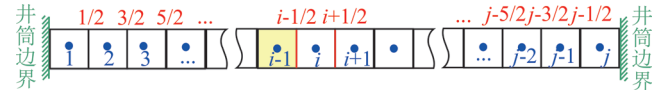


图2 井筒环空网格离散示意图

连续性方程的时间推进可直接采用显格式进行时间离散, $n+1$ 时刻固相连续性方程与液相连续性方程的离散格式分别为:

$$\rho_s \frac{\alpha_{s,i+1/2}^{n+1} - \alpha_{s,i+1/2}^n}{\Delta t} + \rho_s \frac{\alpha_{s,i+1/2}^n u_{s,i+1/2}^n - \alpha_{s,i-1/2}^n u_{s,i-1/2}^n}{\Delta x} = 0 \quad (13)$$

$$\rho_l \frac{\alpha_{l,i+1/2}^{n+1} - \alpha_{l,i+1/2}^n}{\Delta t} + \rho_l \frac{\alpha_{l,i+1/2}^n u_{l,i+1/2}^n - \alpha_{l,i-1/2}^n u_{l,i-1/2}^n}{\Delta x} = 0 \quad (14)$$

对于混合动量方程, 由于钻井液与岩屑的固液两相流为不可压缩流动, 无法通过时间推进进行求解压力项。因此本文采用投影法求解混合动量方程的压力泊松方程, 从而得到 $n+1$ 时刻各相速度与压力的值。

2.2 投影方法

投影法最早由 Chorin 提出^[25], 用于求解不可压缩的纳维斯托克斯方程。该方法通过计算中间时间步得到压力泊松方程, 再对压力泊松方程求解即可得到新时刻的压力值。相比 Simple 类或人工压缩性方法求解不可压缩流动^[26-27], 投影法无需反复迭代进行求解, 极大地提高了计算效率。使用投影法对混合动量方程进行求解, 首先对式(3)进行时间离散, 离散化后的表达式为:

$$\frac{(\rho_l \alpha_l^{n+1} u_l^{n+1} + \rho_s \alpha_s^{n+1} u_s^{n+1}) - (\rho_l \alpha_l^n u_l^n + \rho_s \alpha_s^n u_s^n)}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial x} p^{n+1} - \frac{\partial}{\partial x} [\rho_l \alpha_l^n (u_l^n)^2 + \rho_s \alpha_s^n (u_s^n)^2] - q^n \quad (15)$$

$$\text{令 } w^n = \rho_l \alpha_l^n u_l^n + \rho_s \alpha_s^n u_s^n, \quad F(w^n) = \rho_l \alpha_l^n (u_l^n)^2 + \rho_s \alpha_s^n (u_s^n)^2.$$

将 w^n 与 $F(w^n)$ 代入式(15), 则上式化为:

$$\frac{w^{n+1} - w^n}{\Delta t} = -\frac{\partial}{\partial x} p^{n+1} - \frac{\partial}{\partial x} F(w^n) - q^n \quad (16)$$

将式(16)分裂为式(17)、(18)两部分, 将时间推进分为预算步、压力修正步和最终步三部分进行。预算步与的压力修正步的表达式分别为:

$$\frac{w^* - w^n}{\Delta t} = -\frac{\partial}{\partial x} F(w^n) - q^n \quad (17)$$

$$\frac{w^{n+1} - w^*}{\Delta t} = -\frac{\partial}{\partial x} p^{n+1} \quad (18)$$

首先计算预算步, 对式 (17) 进行空间离散, 可以得到中间时间步 $w_{i+1/2}^*$ 的计算表达式:

$$w_{i+1/2}^* = w_{i+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F(w_{i+1/2}^n) - F(w_{i-1/2}^n)] - \Delta t q_{i+1/2}^n \quad (19)$$

接下来计算压力修正步, 由于环空中的固液两相皆为不可压缩流体, 流体的密度随流动的变化率较低, 可以认为 $n+1$ 时刻守恒变量的散度为 0。对式 (18) 求散度, 可以得到混合动量方程的一维压力泊松方程:

$$\frac{1}{\Delta t} \times \frac{\partial}{\partial x} w^* = \frac{\partial^2}{\partial x^2} p^{n+1} \quad (20)$$

对上式进行空间离散化, 得到离散的压力泊松方程:

$$\frac{w_{i+1/2}^* - w_{i-1/2}^*}{\Delta x} = \frac{p_{i+1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (21)$$

重复式 (19) ~ (21) 可以得到整个井筒空间各节点的压力泊松方程, 将其化为矩阵的形式:

$$\frac{1}{\Delta x} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1^{n+1} \\ p_2^{n+1} \\ p_3^{n+1} \\ M \\ p_{j-1}^{n+1} \\ p_j^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ w_{3/2}^* - w_{1/2}^* \\ w_{5/2}^* - w_{3/2}^* \\ M \\ w_{j-3/2}^* - w_{j-1/2}^* \\ p_{inlet} \end{pmatrix} \quad (22)$$

其中, 出口处的压力使用 Dirichlet 边界条件, 即令 $p_j = p_{inlet}$, 入口处的压力采用 Neumann 边界条件, 已知井底入口处各相的单位外法向速度, 则井底压力 $\frac{\partial p_{out}}{\partial n} = 0$ 。

使用超松弛法对离散的压力泊松方程进行求解, 解出 $n+1$ 时刻的井筒各节点处的压力值 p^{n+1} 后, 即可进行最终步的计算, 对式 (18) 进行空间离散, 并将预算步与压力修正步计算得到 w^* 与 p^{n+1} 代入离散后的式 (18), 即可计算得到 w^{n+1} 。得到 w^{n+1} 后还需进行守恒变量的还原求解 $n+1$ 时刻的固相速度与液相速度。

将式 (13) 与式 (14) 进行变换, 得到 $n+1$ 时刻的液相体积分数与固相体积分数:

$$\alpha_{s,i+1/2}^{n+1} = \alpha_{s,i+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\alpha_{s,i+1/2}^n u_{s,i+1/2}^n - \alpha_{s,i-1/2}^n u_{s,i-1/2}^n) \quad (23)$$

$$\alpha_{l,i+1/2}^{n+1} = \alpha_{l,i+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\alpha_{l,i+1/2}^n u_{l,i+1/2}^n - \alpha_{l,i-1/2}^n u_{l,i-1/2}^n) \quad (24)$$

对固液两相的漂移速度方程进行离散, 得到 $n+1$ 时刻的固相速度与液相速度关系式:

$$u_{s,i+1/2}^{n+1} = c u_{m,i+1/2}^{n+1} - u_{silp} = \frac{c \rho_l u_{l,i+1/2}^{n+1} \alpha_{l,i+1/2}^{n+1} - u_{silp}}{\rho_{m,i+1/2}^{n+1} - c \rho_s \alpha_{s,i+1/2}^{n+1}} \quad (25)$$

将式 (23)、(24)、(25) 代入式 w^{n+1} , 进行变量还原, 通量与液相速度之间的关系为:

$$u_{l,i+1/2}^{n+1} = \frac{w_{i+1/2}^{n+1} (\rho_{m,i+1/2}^{n+1} - c \rho_s \alpha_{s,i+1/2}^{n+1}) + \rho_s \alpha_{s,i+1/2}^{n+1} u_{silp}}{c \rho_s \alpha_{s,i+1/2}^{n+1} \rho_{l,i+1/2}^{n+1} + \rho_l \alpha_{l,i+1/2}^{n+1} (\rho_{m,i+1/2}^{n+1} - c \rho_s \alpha_{s,i+1/2}^{n+1})} \quad (26)$$

得到 $n+1$ 时刻井筒的液相速度分布与固相速度分布。至此 $n+1$ 时刻井筒的压力分布与速度分布全部求解完成, 将该时刻的所有参数作为基础, 计算下一时刻井筒内各点参数值直至计算完毕。

2.3 模型计算步骤

模型的具体计算步骤如图 3 所示。

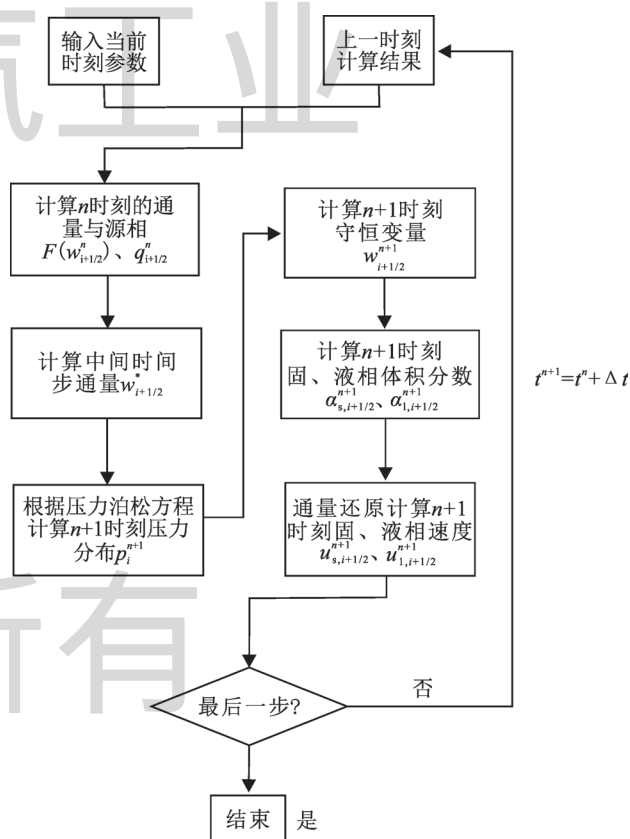


图3 算法计算步骤示意图

①首先输入钻井液排量、钻进速度、井口压力等基本参数, 结合已知 n 时刻井眼环空内各参数的值, 计算 $n+1$ 时刻边界值。②根据 n 时刻的通量与源项, 利用预算步计算中间时刻的守恒变量 w^* 。③对压力修正步求散度, 得到混合动量方程的压力泊松方程。对压力泊松方程进行离散, 将其化为矩阵形式。使用超松弛法对矩阵进行迭代求解, 得到 $n+1$ 时刻井筒的压力分布 p^{n+1} 。④根据 n 时刻的速度与体积分数,

计算 $n+1$ 时刻的固相体积分数与液相体积分数。将各相体积分数与计算得到的结果代入最终步，求解 $n+1$ 时刻的固相速度与液相速度。

重复步骤①~④，即可计算得到全部时刻井筒内全部节点的固液相体积分数、固液速度与压力值。

3 模型算例分析与验证

为验证算法的准确性与实用性，本节将应用所建立的模型模拟钻井过程中岩屑在井眼环空中的瞬态运移规律，如图 4 所示，并对数值模拟所计算结果进行分析验证。

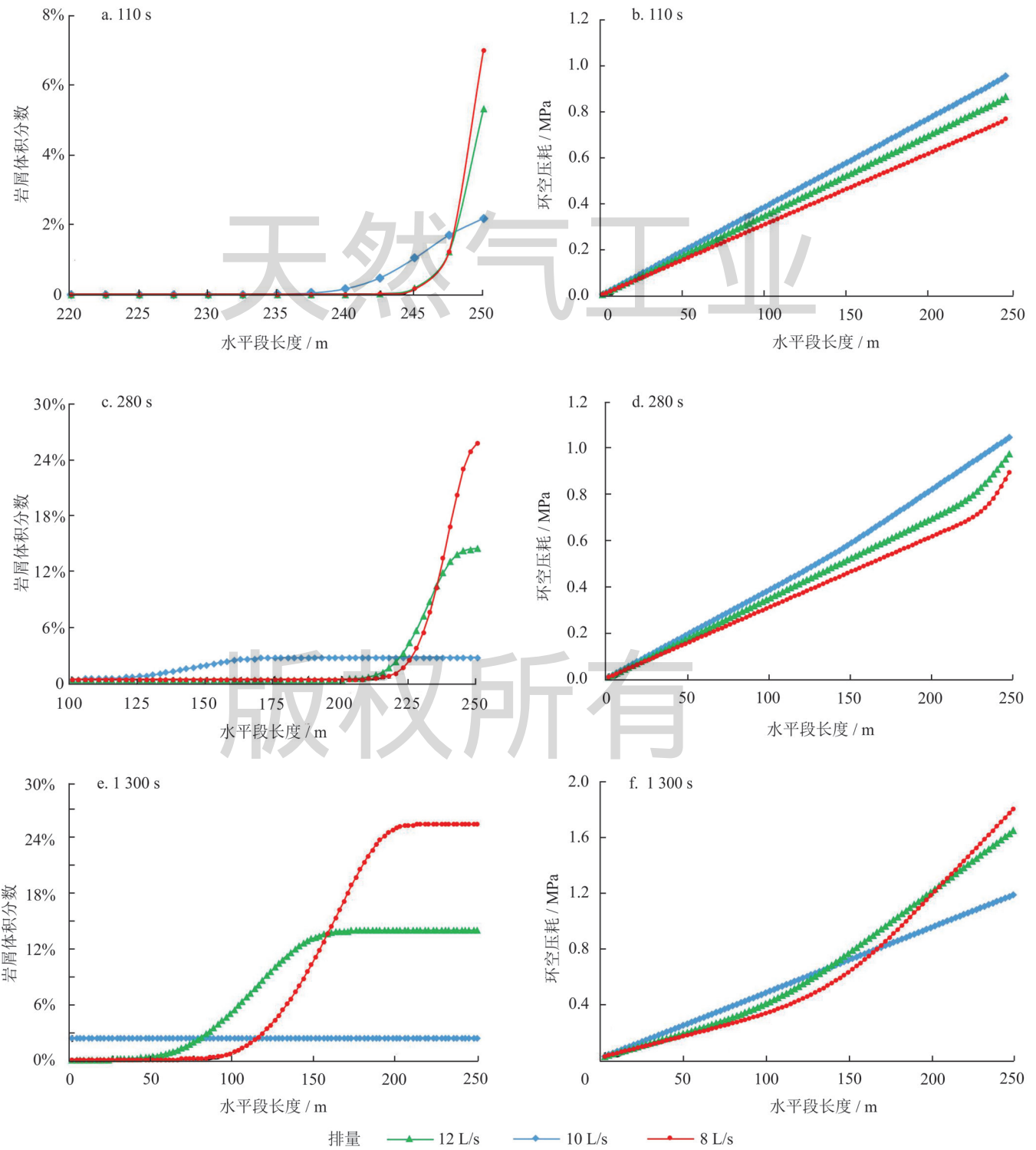


图 4 不同时刻环空岩屑体积分数及环空压耗分布情况图

3.1 模型算例分析

某小井眼水平井水平段长 250 m, 井眼内径 127 mm, 钻杆外径 76 mm, 井斜角 90° , 岩屑密度 2.60 g/cm^3 , 岩屑粒径 34 mm, 钻井液密度 1.18 g/cm^3 , 钻井液有效黏度 $50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。环空排量选取 8 L/s、10 L/s、12 L/s 三种工况, 机械钻速 30 m/h。将井筒划分为 100 个网格, 单位网格长度 2.5 m, 模拟计算总时长 $t=6\,000 \text{ s}$, 时间步长 1 s。模拟开始后向入口处不断注入岩屑, 直至井筒中岩屑体积分数保持恒定时模拟结束。

在模拟开始 $0 \sim 100 \text{ s}$ 时岩屑未进入环空, 此时水平段环空为纯钻井液, 环空中的压力呈线性分布, 液相速度保持恒定。自 100 s 后开始注入岩屑, 图 4-a 为 110 s 时环空中的岩屑体积分数分布, 此时岩屑刚流入环空, 少量随钻井液向出口运移, 绝大部分沉积于入口, 且不同环空排量下的岩屑沉积量差异较大。由于此时三种排量下的钻井参数一致, 仅环空排量不同, 且岩屑进入量较小, 因此环空压力与未进入岩屑时基本一致, 环空压耗主要为钻井液流动所产生阻力, 如图 4-b 所示。

模拟时间达到 280 s 时, 此时岩屑已大量进入环空。如图 4-c 所示, 高排量下岩屑随钻井液快速流动, 自钻头处沿环空逐渐形成稳定岩屑床, 岩屑体积分数保持恒定。低排量下岩屑仍然在不断聚集, 岩屑床仍处于发育阶段, 尚未完全形成, 岩屑体积分数沿

环空不断降低, 且环空排量越低岩屑聚集速度越慢。此时的环空压耗与井底压力明显升高, 环空压耗由岩屑运移与钻井液流动所产生阻力组成, 岩屑体积分数较高的井段环空压耗大幅增加, 如图 4-d 所示。

图 4-e、f 为模拟时间达到 1 300 s 时环空岩屑分布情况与压耗分布情况, 此时高排量下的环空岩屑体积分数已趋于稳定, 固液两相的流动状态不再随时间发生变化。低排量下的岩屑也开始在入口处形成稳定岩屑床, 并沿环空向出口不断运移。此时低排量下的井底压力已高于高排量下的井底压力, 这是因为岩屑运移所产生阻力远高于钻井液流动阻力, 环空岩屑体积分数成为影响环空压耗的主要因素。

模拟时间达到 4 000 s, 此时排量为 10 L/s、12 L/s 的环空中已形成稳定岩屑床, 环空岩屑体积分数保持不变, 排量为 8 L/s 的环空中部分井段的岩屑体积分数仍未稳定, 直至模拟达到 5 400 s 时才形成稳定岩屑床, 此时三种工况下的井底压力与环空压耗也趋于稳定。

图 5-a、b 为排量为 8 L/s 时环空固、液相速度的分布情况。排量一定的情况下岩屑运移速度主要受岩屑体积分数影响, 岩屑体积分数越大则流动产生的阻力越大, 运移速度越慢。且岩屑进入环空后不断聚集并沉积形成岩屑床, 导致钻井液的流道减小, 由于岩屑运移速度较低且密度高于钻井液密度, 因此岩屑体积分数越高的井段液相速度越高。

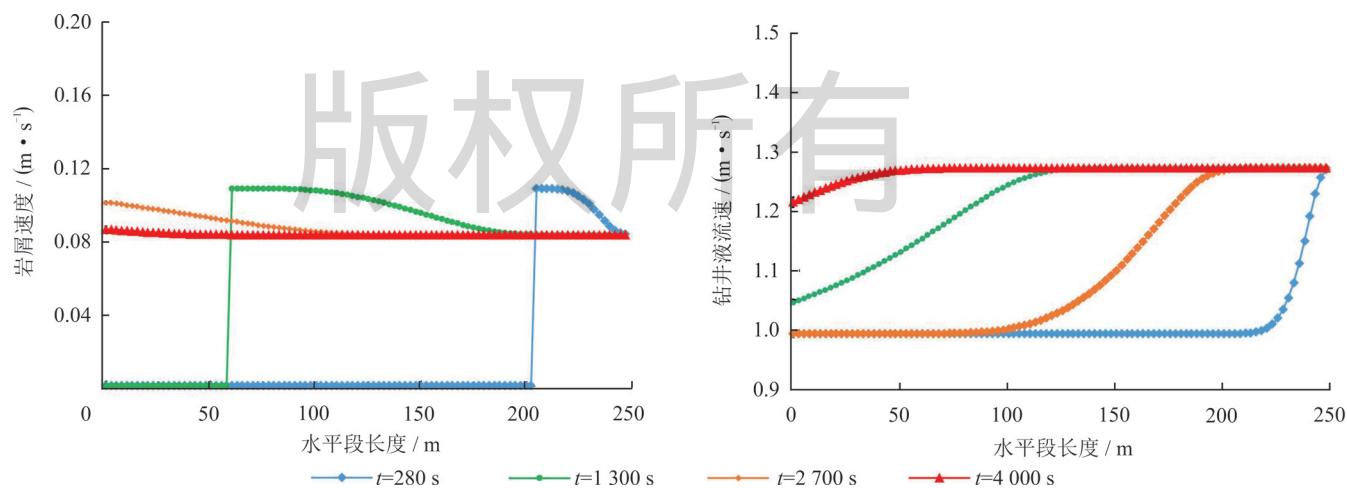


图 5 不同时刻环空固、液相速度分布情况图

图 6 为不同环空排量下形成岩屑床时间, 环空排量较低时岩屑运移速度也较小, 从钻头处运移至出口的时间更长。且由于低排量时钻井液流动速度缓慢, 导致大量岩屑聚集, 环空中的岩屑体积分数增高, 岩屑产生堆积效应, 极大地降低了岩屑运移速度。因此

低排量下形成稳定岩屑床所需时间要远远大于高排量下形成稳定岩屑床所需时间, 岩屑的堆积效应在长水平段钻进过程中尤为明显, 随着水平段长度的增加, 岩屑堆积导致井下摩阻呈指数性增长, 严重影响了水平段的安全钻进。利用本文所建立模型, 可以计算得

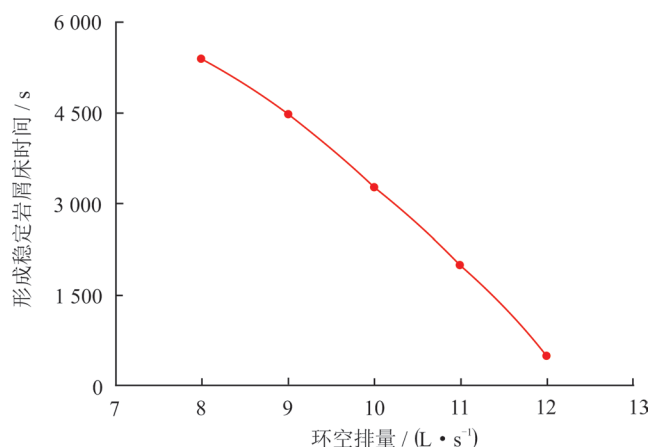


图6 不同环空排量下岩屑床形成时间图

到形成稳定岩屑床所需时间,从而合理设计停钻循环时间或改变泵排量与钻杆转速,在岩屑床影响正常钻进前及时进行清除,预防高摩阻所产生的卡钻、钻具磨损等问题,提升大位移井钻井过程中的井眼清洁效率^[28-30]。

3.2 模型验证

为验证本文所建立模型的准确性,将模型计算结果与稳态岩屑床高度计算模型^[31]进行了对比。取本文算例中的钻井参数进行计算,结果如图7所示。

由图7可知,在环空排量较大时,本文模型与稳态模型计算结果较为接近,在环空排量较小时本文模型所计算岩屑床高度低于稳态模型,由于稳态模型所预测岩屑床高度略高于室内实验的实测值1%~8%,因此可以认为本文所建立模型可以基本满足实际工况中对岩屑床高度进行预测的需求。

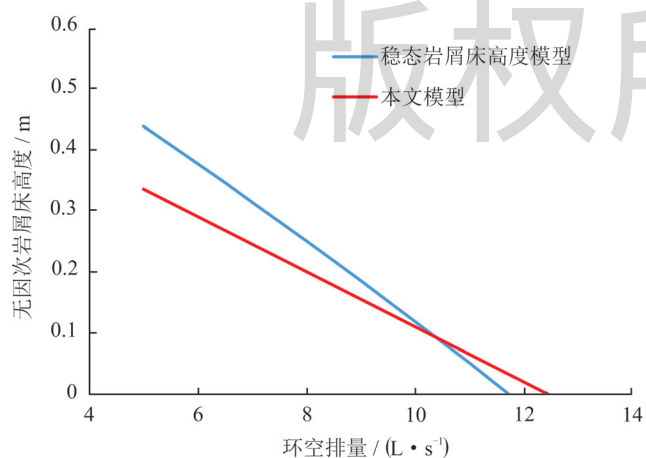


图7 模型对比验证图

4 结论

1) 提出了一种一维瞬态模拟算法,根据钻井携屑实际工程特点将环空固液两相流动简化为一维,采

用基于离散网格有限体积法与投影方法,对模型进行离散化求解,得到了岩屑床高度在井筒中的变化规律。通过与稳态岩屑床高度模型进行对照,验证了本文模型与计算公式的准确性。

2) 应用投影方法对固液混相动量守恒的纳维斯托克斯方程进行数值求解,首先利用中间时间步求解压力泊松方程得到环空中的压力分布,再将连续性方程与漂移流动关系代入混合动量方程,求解得到固相速度、液相速度、固相体积分数与液相体积分数。算法将压力与速度解耦分别进行求解,且无需反复进行内迭代计算,极大地提升了计算效率。

3) 所建立模型可用于研究岩屑床在环空中的形成规律,从而实现水平井环空岩屑床高度的实时监测,且模型求解效率较高,可以满足长水平井段岩屑床计算和监测的需求。模型计算结果可以为水平井的岩屑床高效清除与卡钻事故风险预测提供一定的理论指导。

参考文献

- [1] 孙晓峰. 大斜度井段岩屑运移实验研究与清洁工具优化设计[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
SUN Xiaofeng. Experimental study on hole cleaning and cleaning tool optimal design in highly-deviated hole[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [2] 孙永兴, 范生林, 乔李华. 页岩气水平井卡钻主要原因及预防对策[J]. 天然气工业, 2018, 38(12): 107-113.
SUN Yongxing, FAN Shenglin, QIAO Lihua. Main reasons and preventive countermeasures for pipe sticking in shale-gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 107-113.
- [3] ZENG Cong, YAN Xuefeng, ZENG Zheng, et al. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76: 21-29.
- [4] OZBAYOGLU M E, SAASEN A, SORGUN M. Critical fluid velocities for removing cuttings bed inside horizontal and deviated wells[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(6): 594-602.
- [5] 张洪泉, 任中启, 董明健. 大斜度大位移井岩屑床的解决方法[J]. 石油钻探技术, 1999, 27(3): 6-8.
ZHANG Hongquan, REN Zhongqi, DONG Mingjian. Methods to solve cuttings bed in high-inclination, long-reached well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1999, 27(3): 6-8.
- [6] 孙晓峰, 毛宁, 鞠国帅, 等. 钻杆轴向运动对水平井段岩屑床的清洗效果[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 89-96.
SUN Xiaofeng, MAO Ning, JU Guoshuai, et al. Cleaning effect of a drill pipe's axial movement on cuttings bed in horizontal well sections[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 89-96.
- [7] 孙宝江. 石油天然气工程多相流动[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013.
SUN Baojiang. Multiphase flow in oil and gas engineering[M].

- Dongying: China University of Petroleum Press, 2013.
- [8] LI J, LUFT B. Overview solids transport study and application in oil-gas industry-theoretical work[C]//International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur: IPTC-17832-MS, 2014, IPTC.
- [9] DORON P. Investigation of hydrodynamic phenomena in the flow of solid-liquid mixtures in pipes[M]. Tel Aviv: Tel Aviv University, 1994.
- [10] NAGANAWA S, NOMURA T. Simulating transient behavior of cuttings transport over whole trajectory of extended reach well[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok: SPE-103923-MS, 2006, SPE.
- [11] ZHANG Feifei, MISKA S, YU Mengjiao, et al. Pressure profile in annulus: Solids play a significant role[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137(6): 064502.
- [12] 张菲菲. 固-液两相流及其在井眼清洁中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- ZHANG Feifei. Solid-liquid two-phase flow and its application in borehole cleaning[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [13] AITKEN B, LI J. Solids cleanout analysis reduces screen out risk[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, The Woodlands: SPE-163895-MS, 2013, SPE.
- [14] MARTINS A L, SANTANA C C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells-a dimensionless approach[C]//SPE Latin America Petroleum Engineering Conference, Caracas: SPE-23643-MS. 1992, SPE.
- [15] WANG Zhiming, ZHAI Yujia, HAO Xinling, et al. Numerical simulation on three layer dynamic cutting transport model and its application on extended well drilling[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Ho Chi Minh City: SPE-134306-MS. 2010, SPE.
- [16] ZHANG Feifei, MISKA S, YU Mengjiao, et al. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport-modeling part[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 146-156.
- [17] GUO Xiaole, WANG Zhiming, LONG Zhihui. Study on three-layer unsteady model of cuttings transport for extended-reach well[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 73(1/2): 171-180.
- [18] FALLAH A, GU Qifan, SAINI G, et al. Hole cleaning case studies analyzed with a transient cuttings transport model[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Virtual: SPE-201461-MS. 2020, SPE.
- [19] 赵利安, 许振良, 王铁力. 浆体管道输送理论与技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- ZHAO Li'an, XU Zhenliang, WANG Tieli. Theory and technology of slurry pipeline transportation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2018.
- [20] ZUBER N, FINDLAY J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(4): 453-468.
- [21] 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.
- [22] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28-32.
- SONG Xianzhi, LI Gensheng, WANG Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28-32.
- [23] WALTON I C. Computer simulator of coiled tubing wellbore cleanouts in deviated wells recommends optimum pump rate and fluid viscosity[C]//SPE Production Operations Symposium. Oklahoma City: SPE-29491-MS. 1995, SPE.
- [24] OKESANYA T, KURU E, SUN Yanxin. A new generalized model for predicting the drag coefficient and the settling velocity of rigid spheres in viscoplastic fluids[J]. SPE Journal, 2020, 25(6): 3217-3235.
- [25] CHORIN A J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations[J]. Mathematics of Computation, 1968, 22(104): 745-762.
- [26] PATANKAR S V, SPALDING D B. Paper 5-A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[M]//PATANKAR S V, POLLARD A, SINGHAL A K, et al. Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. New York: Pergamon, 1983: 54-73.
- [27] HARLOW F H, WELCH J E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface[J]. The Physics of Fluids, 1965, 8(12): 2182-2189.
- [28] 陈锟, 夏成宇, 冯超, 等. 页岩气水平井岩屑沉降规律仿真 [J]. 石油机械, 2021, 49(11): 1-9.
- CHEN Kun, XIA Chengyu, FENG Chao, et al. Simulation of cuttings settling in horizontal shale gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(11): 1-9.
- [29] 王志亮, 张震, 周旺明, 等. 页岩气井眼净化模拟研究及影响因素分析 [J]. 石油机械, 2021, 49(7): 23-30.
- WANG Zhiliang, ZHANG Zhen, ZHOU Wangming, et al. Shale gas wellbore cleaning simulation and influencing factors analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 23-30.
- [30] 王志亮, 夏成宇, 张震, 等. 改进型铝合金钻杆对岩屑运移仿真分析 [J]. 石油机械, 2021, 49(10): 17-23.
- WANG Zhiliang, XIA Chengyu, ZHANG Zhen, et al. Simulation analysis of cuttings migration in improved aluminum alloy drill pipe[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(10): 17-23.
- [31] 汪海阁, 刘希圣, 丁岗. 水平井段岩屑床厚度模式的建立 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1993, 17(3): 25-32.
- WANG Haige, LIU Xisheng, DING Gang. The model of cuttings bed thickness in horizontal well section[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1993, 17(3): 25-32.

