

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(石油与天然气工程) ·

长水平井中动态井眼清洁对钻柱受力影响研究进展

张菲菲^{1*} 王 茜¹ 余义兵¹ 马卫国² 彭 涛¹ 李紫璇¹

1. 长江大学 石油工程学院, 武汉 430100

2. 长江大学 机械工程学院, 荆州 434023

[摘要] 长水平井在油气勘探开发中普遍应用,但面临井眼清洁不充分、托压、卡钻等一系列问题。水平井钻进时在水平和造斜段普遍存在岩屑床堆积,对钻柱受力状态产生显著影响。传统研究将岩屑运移分析和管柱受力分析相互分隔,独立研究。实际钻井过程中动态岩屑运移与钻柱受力及运动状态相互影响。本文讨论长水平井中动态岩屑运移模拟过程,总结了不同井斜区间钻进时岩屑分布和钻柱受力的变化规律;提出动态岩屑运移与钻柱力学耦合模型;展示了大位移井实际钻进过程中动态岩屑床分布与钻柱扭矩、轴向力能力之间的关系。文中还展望了针对长水平井施工实际需求的未来研究方向,为实时监测井眼清洁状态、钻柱受力情况,从而预警潜在风险、优化钻进参数提供理论支撑和科学依据。

[关键词] 井眼清洁;钻柱受力;长水平井;固-液两相流;实时分析

长水平井是提高页岩油气、致密油气和海上油田等特殊油气藏开发效益的重要技术,是目前的重点研究方向^[1]。在长水平井施工过程中由于井筒倾斜角大而且倾斜井段长、重力效应突出,导致一系列钻井问题频繁发生,其中最突出的问题包括岩屑堆积和大摩阻而导致的滑动钻进困难、钻速慢、托压和地面驱动装备转动扭矩不足、卡钻、钻柱磨损断裂等^[2]。在长水平井的倾斜井段和水平井段中岩屑床的分布对钻柱受到的摩阻、钻柱在井筒中的位置和钻柱屈曲有非常重要的影响^[3]。随着倾斜井段和水平井段长度的增加,这种影响尤其显著。统计数据显示大约70%的钻井时间损失与钻具卡阻有关^[4],而大约有1/3的钻具卡阻问题与井眼清洁不充分有关^[5]。传统的岩屑运移研究与钻柱受力研究分别属于不同的领域,绝大多数钻柱力学分析研究中都没有考虑岩屑堆积的影响,导致传统方法在分析长水平井长时间钻进过程中有较大的误差,目前仍缺乏将两者结合到一起进行系统性分析的机理研究。岩屑运移与钻柱力学分析都已经经历了长时间的研究,但传统的独立研究已经不能满足实际工程的需



张菲菲 长江大学教授、博士生导师,湖北省杰出青年基金获得者。主要研究领域为智能钻井监控、人工智能在钻井中的应用、钻井水力学、管柱力学、井眼清洁等。主持国家自然科学基金面上项目1项、湖北省自然科学基金重点类项目1项、国际合作项目1项、国家重大专项子任务1项、国家重点实验室开放课题1项;中石油、中石化、中海油等油田企业合作项目15项。发表论文30余篇,出版专著1部,获湖北省科学技术进步奖二等奖1项。

求,将岩屑运移与钻柱力学两者进行耦合研究是该领域研究的发展趋势。

本文介绍长水平井及大位移井钻进过程中的动态岩屑运移过程及建模方法,讨论动态岩屑分布对钻柱的运动及受力影响,提出考虑井眼清洁影响的钻柱力学分析模型,展望了该研究方向未来的发展。

1 动态井眼清洁研究进展

1.1 井眼清洁发展与现状

岩屑运移研究起始于1940年左右,早期研究主要集中于竖直井中岩屑在钻井液中的沉降速度。倾斜和水平井中的岩屑运移研究开始于上世纪八十年

收稿日期:2021-05-20;修回日期:2021-09-25

* 通信作者,Email:feifei-zhang@yangtzeu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51874045)、湖北省自然科学基金项目(2019CFA093)的资助。

代初,主要包括实验研究^[6-9]和层状力学模型^[10-12]。21 世纪后开始对岩屑运移流型及其变化机理的研究。揭示出不同流动条件下岩屑在流动钻井液的分布形态变化,产生流型分类及流型图(如图 1 所示),对确定不同阶段的携岩机理,建立更符合实际情况的计算模型起到重要的推动作用^[13-15]。

但大多数岩屑运移研究及模型的基于稳态假设,无法考虑钻井过程中各种参数的不断变化而引起的岩屑在井眼内的分布变化。少数几个动态(非稳态)模型研究也只适用于某一井段或某一种流型的局部分析,使得研究结果不能拓展应用到描述整个钻井过程中岩屑在大位移井全井段的连续运移过程。这在长水平井钻进过程中会产生较大误差,对实际施工提供的指导分析具有很大的局限性。

1.2 动态井眼清洁监测与分析

通用固-液两相流模型可以用来分析岩屑在水平井整个井眼内的动态运移过程^[16]。该模型根据固-液两相流理论,结合钻柱运动状态,建立起包含岩屑与钻井液所有可能流型的流型图(图 2),并得到不同流型之间的转换条件(图 3)。针对不同的流型,基于质量守恒和动量守恒基本方程,建立水平井全井段动态岩屑运移模型。模型根据具体井段和钻井操作参数自动判断岩屑的流型和运动状态,并选择最合适的理论方法进行岩屑运移计算。通用固-

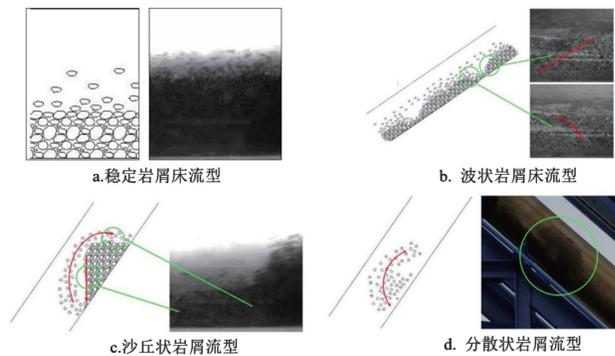


图 1 岩屑运移流型

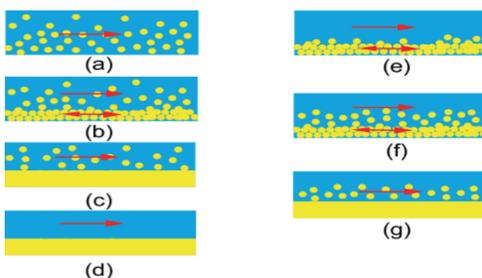


图 2 井眼中的岩屑流型

液两相流模型能够同时处理时间域和空间域的流型变化,以适应钻井过程中不断变化的作业参数。利用该方法,可以在动态钻井过程中连续、平稳地跟踪岩屑在井筒中的运移全过程,由此可以模拟整个钻井过程中任何时间点岩屑在整个井眼中的分布状态和井眼压力等参数。

图 2 所示的所有流型的每个层都有自己的质量守恒和动量守恒方程。因此,给定流型的方程总数取决于其总层数(例如,图 2(f)中流型有六个方程(三个质量守恒方程和三个动量守恒方程,因为它有三个不同的层)。流型之间的转变依据为瞬时岩屑沉降和再悬浮,根据流型不同,可能需要不同的闭合关系来求解这些方程^[17]。

模型求解采用有限体积差分法,整个井眼被分成一系列网格。每个网格的未知量包括压力梯度、每个层的流速和每个层的面积。模型根据流型自动选择合适的守恒方程组并进行离散,构建贾科比矩阵求解。整个模型的求解过程如图 4 所示。

长水平井钻井过程中,为防止出现大量岩屑床堆积,一般遵循“钻进-停钻循环”交替出现的钻进程序。岩屑床在水平井内也呈现出波状的不连续分布。图 5 为一个典型长水平井在一个周期(即钻-

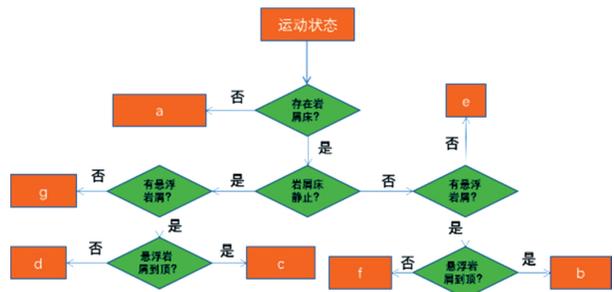


图 3 流型自动判别流程图

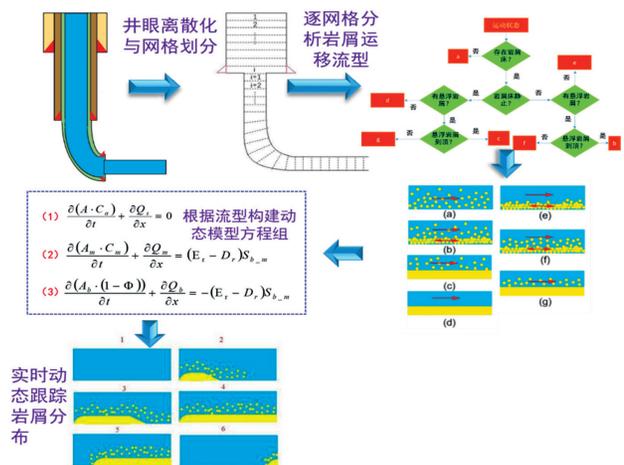


图 4 通用动态固-液两相流模型求解过程

根立柱长度然后循环一个周期)的钻进过程中岩屑在井眼内的动态分布变化。图中红色代表岩屑,图 5(a)为岩屑床在井底刚生成的过程,图 5(b)为岩屑床在井底充分形成的过程,图 5(c)为停钻循环时岩屑床向上运移的过程,图 5(d)为再次开钻,第一个岩屑床继续上移,新岩屑床在井底刚生成的过程。

2 岩屑床对钻柱受力影响研究进展

2.1 钻柱力学发展与现状

在水平井和大位移井中,随着水平位移的加长,大部分钻柱躺在井眼的底边,钻柱与井壁的接触摩擦阻力很大,转动钻柱需要很大的扭矩。水平段钻柱长度增加,钻柱传递扭矩和钻压的能力会随之降低,给正常钻进过程带来一系列的问题,如钻压施加困难、钻杆屈曲、钻柱卡阻等。目前国内外在钻柱力学模型的研究上分为软杆模型和刚杆模型两种模型。软杆模型因为相对简单、计算量小而且结果误差在实际工程的可接受范围内而被广泛应用,成为业界的标准^[18]。刚杆模型计算结果更加准确,但在环空间隙小、井眼轨迹狗腿度大等特殊情况下误差较大^[19]。但是,现有的这两类模型都没有考虑堆积岩屑的影响,在长水平井和大位移井的应用中会有很大误差^[20]。

2.2 岩屑对钻柱运动的影响规律

在钻井过程中,钻柱在井眼内的位置和与井壁的接触状态受井斜角、转速、岩屑床分布等因素影响。

图 6 为水平井中钻柱在静止、旋转,以及有、无岩屑床存在四种不同情况下的位置变化。钻柱的运动状态和在井眼中的位置不同会产生不同摩擦类型(滚动摩擦、滑动摩擦、静摩擦),从而对钻柱的摩擦/扭矩损失产生明显不同的影响。钻柱与井壁之间的摩擦系数取决于材料性质和接触界面光滑程度。岩屑的出现改变了无岩屑条件下钻柱与井壁的接触,增大了岩屑与钻柱之间的接触粗糙度,导致钻柱与岩屑床之间的滑动摩擦系数增大;另外,随着堆积岩屑高度的增加,钻柱与周围的接触面积也增加,旋转的钻柱由在井壁内滚动变为与岩屑床之间的相对滑动,改变了接触面的摩擦性质。因此,一般情况下,岩屑的出现会使钻柱运动所受的阻力明显增大。

为明确岩屑床对钻柱的影响,借助流-固耦合模拟实验平台(如图 7 所示),可以进行钻柱与井壁在不同岩屑分布条件下的摩擦系数变化规律研究。

实验研究表明,在转动条件下,钻柱所受扭矩变化与井眼内的岩屑床高度成指数型关系,如图 8 所示。

图中的横轴为无量纲的岩屑床高度,定义为岩屑床高度与井眼直径之比,纵轴为不同岩屑床高度下扭矩的变化率,定义为有岩屑扭矩与同等条件下无岩屑扭矩之差再除以无岩屑条件下的扭矩,如公式 1 所示。

$$h_s = \frac{h_c}{D} \quad (1-a)$$

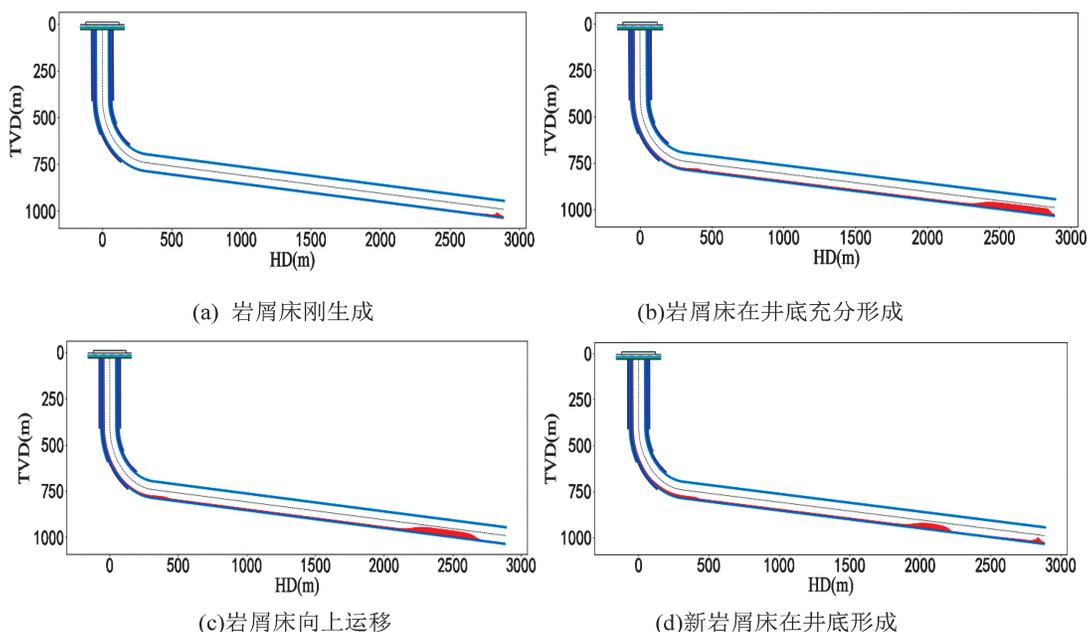


图 5 岩屑在一个周期内的动态生成、堆积、运移过程

$$T_R = \frac{T_s - T_c}{T_c} \quad (1-b)$$

式中, h_c 为岩屑床高度, mm; D 为井眼直径, mm; h_s 为无量纲岩屑床高度; T_s 为有岩屑床的扭矩值, kN · m; T_c 为同等条件下无岩屑的扭矩值, kN · m; T_R 为由岩屑引起的扭矩变化率, 无量纲。上图为 $\Phi 114$ mm 的钻柱在 $\Phi 216$ mm 的光滑水平井眼中(光滑程度与套管接近)扭矩的变化规律。该结果受钻柱尺寸、井眼尺寸、井斜角、井壁的摩擦系数等多个因素的影响。最新研究对不同条件下岩屑对钻柱受力影响进行了一系列的实验研究, 并使用统计学和数据分析方法来综合识别不同的摩擦类型和其相应的摩擦系数, 建立了表征摩擦类型变化特征和摩擦系数分布特征的特征函数, 如公式 2 所示。

$$f_R = \alpha(h_s)^\beta \quad (2)$$

式中, α 和 β 为两个无量纲参数, f_R 为摩擦系数变化率, $f_R = (f_s - f_c)/f_c$, f_s 为标准化岩屑床高下的摩擦系数; f_c 为没有岩屑时的摩擦系数。上式中岩屑分布与摩擦系数之间的关系为分析考虑岩屑影响的局部钻柱受力情况, 推导出适用于水平井和大位移井中有岩屑堆积情况下钻柱力学模型提供了基础数据。

2.3 井眼清洁与钻柱力学耦合模型

动态井眼清洁与钻柱受力的耦合建模需要把动态岩屑运移模型的实时岩屑分布结果与钻柱在井筒中的位置和状态相结合, 通过对局部岩屑分布与钻柱受力耦合的数理模型的积分, 结合运动学条件和

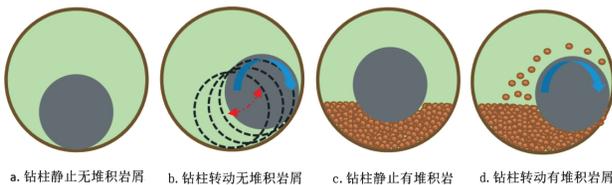


图 6 钻柱在不同状态下在水平井筒中的位置



图 7 长江大学智能钻井流-固耦合实验平台

物理耦合条件, 建立钻井过程中可以反应动态井眼清洁影响的摩擦扭矩模型。该模型在传统的软杆模型中加入来自岩屑床的附加力, 起下钻时, 附加力施加在钻杆轴向, 表示岩屑床对钻杆轴向作用力的影响; 钻杆旋转时, 附加力与钻杆壁曲面相切, 方向与旋转方向相反, 如图 9 所示。

通过对钻杆单元体进行受力分析, 建立旋转钻杆的力和力矩平衡方程, 方程如下:

$$\frac{dF_t}{ds} + w_p \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

$$F_t k + w_p n_z + w_c \cos \theta + \mu w_c \sin \theta + F_c \cos \theta + \mu F_c \sin \theta = 0 \quad (4)$$

$$w_p b_z - w_c \sin \theta + \mu w_c \sin \theta - F_c \cos \theta + \mu F_c \sin \theta = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dM_t}{ds} - \mu(w_c + F_c)r_p = 0 \quad (6)$$

$$M_t \kappa = 0 \quad (7)$$

式中, F_t 为轴向力, N; w_p 为钻杆单位重量, N; w_c 为接触力, N; t_z 、 n_z 和 b_z 分别是 z 方向上单位切向、法向和副法向向量; θ 为沿 $n-b$ 平面法线与接触力间的夹角, °; F_c 是岩屑床施加的附加力, N; φ 为井斜角, °; μ 为摩擦系数, 无量纲; r_p 为钻杆半径, m; M_t 为钻杆旋转所需的轴向扭矩, N · m; ds 为钻杆单元的长度, m; κ 为曲率, m^{-1} 。

除了每个单元体的附加摩擦力需要基于局部岩屑床的高度来计算之外, 用于解改进摩擦扭矩模型

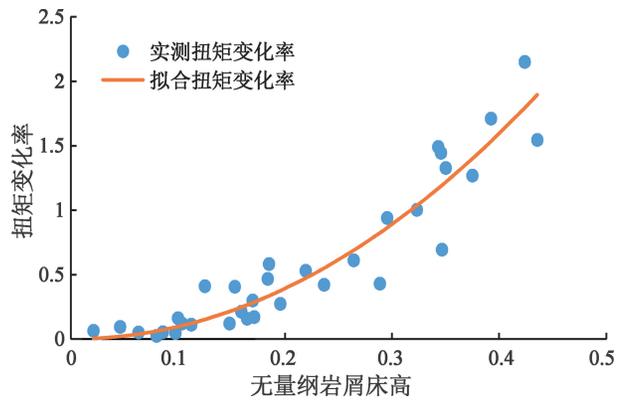


图 8 标准化岩屑床高和扭矩变化率的关系图

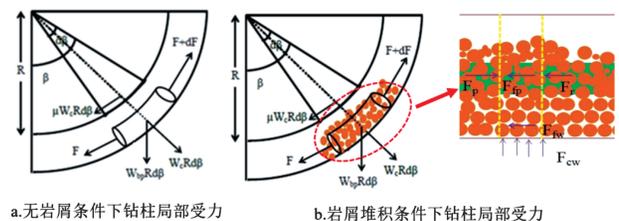


图 9 岩屑堆积对局部钻柱受力影响

的算法与解标准摩阻扭矩模型的算法相似。动态井眼清洁模型与摩阻扭矩模型结合应用时,以实际的钻井操作参数作为输入,预测岩屑床在井眼中的实时动态分布。摩阻扭矩模型将岩屑床的分布预测结果作为输入,计算出每个离散点的附加力,最后得出整个钻柱的摩阻扭矩分布。

图 10 为钻柱扭矩梯度随岩屑分布改变的变化,图中岩屑床高度为图 5 中一个周期内岩屑动态变化,图中 T_g 代表不考虑岩屑影响的扭矩梯度, T_{cg} 代表考虑岩屑影响的扭矩梯度。从分析结果可以发现:岩屑在井底生成到向上运移的过程中,局部井段岩屑床的存在改变了钻具的受力情况,明显增加了对应井段钻柱扭矩的变化量。随着岩屑床被清理,钻柱扭矩变化量回复正常状态。

3 基于长水平井施工需求的钻井基础理论研究建议

传统井眼清洁分析和钻柱摩阻扭矩分析主要用于钻井施工前的方案设计、钻进设备配置和钻井参数选取。随着能源市场的发展,油气行业增效、降本的需求对准确、高效的实时钻井监测及优化技术的需求越来越强烈。该技术发展的基础是能模拟钻井动态过程、对工况变化适用性强、计算结果准确、并且能从整个工程全局进行分析的基础钻井理论模型及方法。针对长水平井施工过程中频发的井眼清洁不充分、钻柱摩阻/扭矩损失大、钻压不足、机

械钻速低、托压、卡钻等问题,需要在钻进过程中对井眼清洁及钻柱受力进行实时、准确的监测计算,及时判断井下岩屑分布和钻柱的受力及运动状态,预警潜在风险,然后进行实时钻井参数的优化,从而减少钻井事故、降低长水平井钻井成本。为促进井眼清洁和钻柱力学模型在实时钻井监测中的使用,推进钻井智能化发展,提出以下建议:

3.1 从井下实际情况出发,发展多因素耦合的钻井模型

大多数传统钻井分析算法相互独立,不能从全局进行耦合计算分析。但是,在实际钻井过程中,井下事故的发生与工程参数的优化是多因素共同作用的结果。准确监测实际钻井过程中的岩屑分布、钻柱受力等井下工况,需要综合考虑所有重要影响因素之间的相互关系。新模型的研究应进一步打破现有分割,研发能从全局角度来计算钻井动态过程中不同模块、不同过程之间的相互作用关系的模型,例如井下动态温度变化与固-液两相流动之间的关系、钻柱摩阻扭矩变化与钻柱的瞬态振动之间的关系、钻柱受力与软地层井壁变形之间的关系等。

该方向的核心科学问题为:(1) 探索不同因素之间的相互影响关系并建立合理的数理模型;(2) 寻找合适的求解方法保证模型可以及时快速收敛,满足实时计算需求。

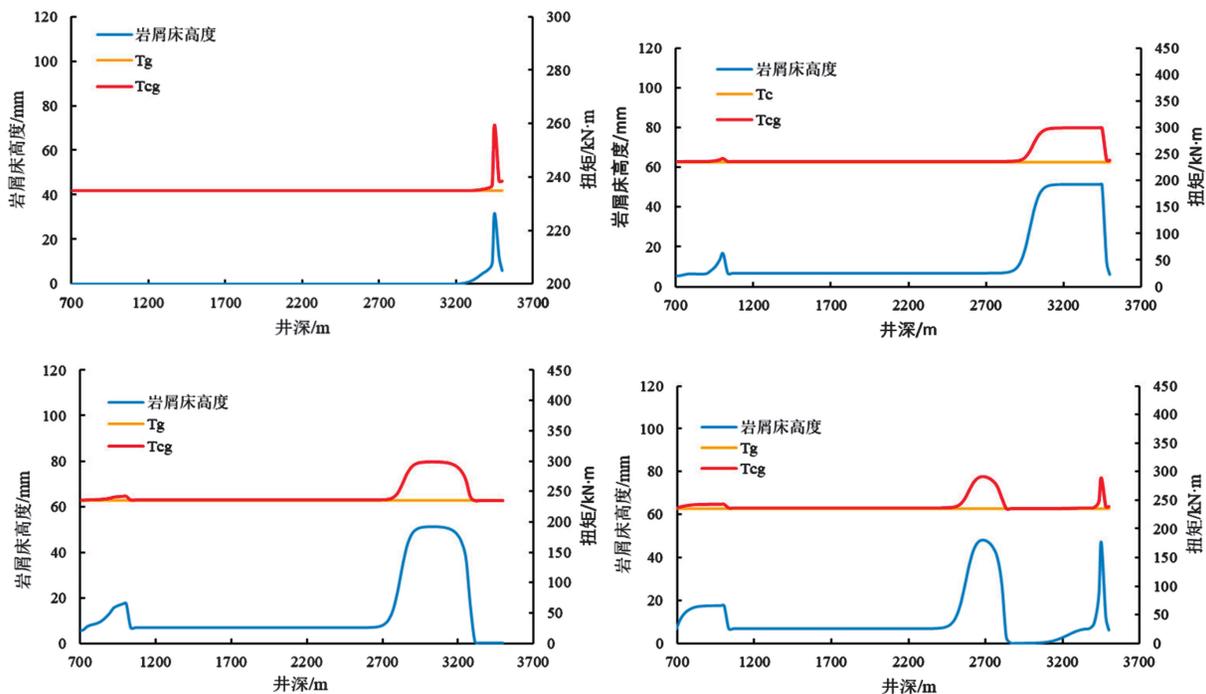


图 10 扭矩梯度随岩屑分布改变的变化过程

3.2 与人工智能学科交叉,发展智能化模型

现有钻柱力学及井眼清洁模型都是在真实物理过程上进行一定的简化和假设,内部有一些经验系数或闭合关系,使得工况发生明显变化时计算结果可能会出现较大偏差。另外,地下井眼内有众多不确定性因素(包括井眼轨迹、尺寸、地层特性、地温梯度、地应力分布等参数)。现有方法为当计算结果出现偏差时由人工进行手动调参,修改模型。根据实际计算结果,能自动进行自我修正、自动评估输入参数不确定性的智能化模型也是重要发展方向之一。该研究方向将动态固-液两相流模型及钻柱力学模型与人工智能相交叉,研究能根据实际结果不断实时自我修正的智能化模型和算法。另外,如何处理钻完井过程中的不确定性信息并对计算结果的影响做出决策机理,对模型在实际工程中的应用有重要意义。

该方向的核心问题为:(1) 如何使用复杂钻井工况条件下产生的带有大量噪音的实时钻井数据,整合具有完全/不完全混杂、不同时间尺度混杂、不同类型混杂的数据,并从这些数据中提取出准确和有用的信息用于模型的训练和自我学习;(2) 针对复杂、非线性的物理模型,如何将机器学习算法与之有效的结合。

3.3 与实际工程需求结合,发展自动诊断及优化技术

现有摩阻扭矩分析、井眼清洁模型与实际施工条件仍有一定脱节,需进一步提升模型来考虑复杂的井下工具影响,如长水平井中井眼清洁器对动态井眼清洁效果的量化影响及在岩屑运移模型中的模拟方式、水力振荡器对摩阻扭矩的作用效果及其在钻柱力学模型中的建模方法。另外,对实际工程施工,解决钻井问题或提升钻井速度有多个参数或因素可供调整,产生的结果也会受多个工程因素的制约。未来钻井的自动化及智能化要求模型能自动诊断钻井过程中出现的异常条件,并提供多参数共同约束条件下的优化解决方案。

该方向的核心问题为:(1) 研究常用井下工具(井眼清洁器、水力振荡器等)对井眼清洁、钻柱受力等因素的量化影响关系及计算方式;(2) 针对长水平井实际钻井需求、考虑多因素共同作用的目标函数建立;(3) 在兼顾井下不确定因素条件下,建立与钻柱力学模型、动态多相流模型等钻井模型相联动的钻井参数自动优化算法。

4 结 语

长水平井在油气勘探开发中的占比不断增加,迫切需要深入研究长水平井钻进过程中频发的工程问题背后的基础科学机理,把握钻井监测与优化过程的实时化与智能化的未来发展前沿及趋势,实现多学科、多角度、多领域的深度交叉。促进长水平井在降低钻井成本、减少事故率方向的技术发展,进而推动油气行业研究的发展。目前国内外有关长水平井井眼清洁与摩阻扭矩耦合及智能化的研究还处于初级阶段。这一研究领域涉及多学科交叉和综合运用,极具挑战性,且其涉及的诸多关键科学问题尚不明晰,且亟待解决。本文讨论长水平井动态井眼清洁与钻柱受力耦合分析的最新研究进展,提出了可能的发展方向,以为长水平井钻井技术发展提供支撑,力争对促进和推动我国油气钻井行业发展产生积极意义。

参 考 文 献

- [1] 孙宝江,曹式敬,李昊,等. 深水钻井技术装备现状及发展趋势. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 8—15.
- [2] 苏义脑, 窦修荣. 大位移井钻井概况、工艺难点和对工具仪器的要求, 石油钻采工艺, 2003, 25(1): 6—10.
- [3] Bassal A. The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores. Oklahoma: University of Tulsa, 1995.
- [4] Massie GW, Castle SJ, Lee JW, et al. Amoco's training initiative reduces wellsite drilling problems. Petroleum Engineer International, 1995, 67(3): 416—430.
- [5] Hopkins CJ, Leicksenring RA. Reducing the Risk of Stuck Pipe in The Netherlands// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands. Society of Petroleum Engineers, 1995: 757—767.
- [6] Iyoho AW. Drilled-cuttings transport by non-newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli. Oklahoma: University of Tulsa, 1980.
- [7] 汪海阁, 刘希圣, 李洪乾, 等. 水平井段钻井液携带岩屑的实验研究. 石油学报, 1995, 16(4): 125—132.
- [8] 韩树, 李根生, 黄中伟, 等. 连续油管带筛管侧钻多分支井双重环空携岩能力实验. 石油学报, 2016, 37(8): 1053—1060.
- [9] 翟羽佳, 汪志明, 张同义. 充气欠平衡钻井水平段环空岩屑运移规律实验研究. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 63—71.
- [10] Gavignet AA, Sobey IJ. Model aids cuttings transport prediction. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(9): 916—921.

- [11] 汪志明, 张政. 水平井两层稳定岩屑传输规律研究. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(4): 63—66.
- [12] 郭晓乐, 汪志明, 龙芝辉. 大位移钻井全井段岩屑动态运移规律. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 72—76.
- [13] 张杰, 陈平, 石晓兵, 等. 大斜度井段岩屑运移规律的微观研究. 天然气工业, 2003, 23(S1): 73—74, 9.
- [14] Corredor F. Solids transport with turbulent flow of a drag reducing fluid in the horizontal annuli. Edmonton: University of Alberta, 2013.
- [15] Zhang FF, Miska S, Yu MJ, et al. Pressure profile in annulus; solids play a significant role. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137(6): 064502.
- [16] Zhang FF, Miska S, Yu MJ, et al. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport- modelling part. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 146—156.
- [17] Zhang F. Numerical simulation and experimental study of cuttings transport in intermediate inclined wells. Oklahoma: University of Tulsa, 2015.
- [18] Ho HS. General formulation of drillstring under large deformation and its use in BHA analysis// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [19] Mason CJ, Chen DC, Exploration BP. Step changes needed to modernize T&D software// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, 2007.
- [20] Cayeux E, Skadsem HJ, Daireaux B, et al. Challenges and solutions to the correct interpretation of drilling friction tests// SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Hague, 2017.

Research Progress on Influence of Dynamic Hole Cleaning on Drill String Stress in Long Horizontal Wells

Zhang Feifei^{1*} Wang Xi¹ Yu Yibing¹ Ma Weiguo² Peng Tao¹ Li Zixuan¹

1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100

2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023

Abstract Long-lateral drilling is widely used in oil and gas exploration and production activities. However, a series of problems, such as insufficient hole cleaning, drill pipe stuck, are commonly encountered during the drilling of long-lateral wells. It is common to have cuttings bed packed in the deviated and horizontal parts of the wellbore during drilling horizontal laterals. Cuttings transport efficiency and the forces acting on the drill string can affect each other significantly. However, traditional studies on cutting transport and tubular mechanics were isolated from each other. In actual drilling practices, the transient cuttings distribution in the wellbore and the drill string mechanics interact with each other closely. It is required to analyze these two aspects together to obtain an optimized drilling plan. This paper investigates the transient cuttings transport process in different sections of the well and its effect on tubular mechanics. A coupled transient cuttings transport and torque & drag model is discussed to simulate the effect of cuttings on torque, drag, and drill string movement. The effect of cuttings bed on the torque and axial force distribution along the drill string is revealed. The future possible research topics on how to apply the developed models into the real-time hole cleaning monitoring and drilling optimization for long lateral drilling are also discussed at the end of the paper.

Keywords hole cleaning; drilling string stress; Long Horizontal Wells; solid-liquid two phase flow; real-time optimization

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: feifei-zhang@yangtzeu.edu.cn