

泥浆性能对钻井井底压力与岩屑运移的影响分析

张青

中国石油集团长城钻探工程有限公司, 辽宁 盘锦

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

泥浆性能对钻井效率和安全有着重要影响。基于威远页岩气钻井数据, 利用大位移钻井水力学分析优化系统分析了泥浆性能对页岩气钻井井底压力与岩屑运移的影响规律, 结果表明, 温度和压力会改变泥浆密度和有效粘度, 井筒内实际泥浆密度和有效粘度与地面值存在一定差值; 随泥浆排量、密度和有效粘度增加, 井底ECD增加, 环空岩屑床高度减小, 随机械钻速增加, 钻进所需最小排量增加, 其中, 斜井段所需最小排量比直井段要大。

关键词

钻井, 泥浆性能, 井底压力, 岩屑运移

Influence Analysis of Mud Performance on Bottom Hole Pressure and Cuttings Transport in Drilling

Qing Zhang

CNPC Greatwall Drilling Engineering Company Limited, Panjin Liaoning

Received: Jun. 14th, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

Mud performance has a significant impact on drilling efficiency and safety. Based on Weiyuan shale gas drilling data, the influence of mud performance on shale gas drilling bottom hole pressure and cuttings transport is analyzed by using the Extended Reach Drilling Hydraulics Analysis

Optimization System. The results show that temperature and pressure will change the actual mud density and effective viscosity, and there is a certain difference between the value of mud density and effective viscosity in the wellbore and the ground; as the mud flow rate, density, and effective viscosity increase, the bottom hole ECD increases, and the height of the annular cuttings bed decreases. As the drilling speed increases, the minimum flow rate required for hole cleaning increases. Furthermore, the minimum flow rate required for the inclined section is larger than that for the vertical section.

Keywords

Drilling, Mud Performance, Bottom Hole Pressure, Cuttings Transport

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是能源消耗大国，四川盆地是我国最重要的页岩气开发区块，资源潜力巨大[1]。目前现场普遍采用水平井开发页岩气，由于储层埋藏深，钻遇地层复杂，钻井难度较大[2]。钻井液，俗称泥浆，是钻井的血液，在钻井过程中发挥着冲洗岩屑、稳定井壁、控制井筒压力、传递水功率和冷却润滑钻具等重要作用[3]。随着井深的增加，井筒温度和压力增加，高温高压会影响泥浆性能，从而影响井底压力和岩屑运移。为此，国内开展了大量高温高压对泥浆性能影响[4] [5] [6]、深井超深井井筒温度场[7] [8] [9]以及井底压力计算模型[10] [11]的研究，但这些研究很少将三者耦合在一起计算，也没有专门结合四川页岩气钻井实际数据进行分析。因此，本文基于工程实际钻井数据，利用引进的大位移钻井水力学分析优化系统[12]，在考虑井筒温压耦合影响的基础上，分析了泥浆性能对页岩气钻井井底压力与岩屑运移的影响规律，所得结果对页岩气钻井具有一定的指导意义。

2. 计算软件与模型

大位移钻井水力学分析优化系统基于先进的流体力学理论，由重庆科技学院研究团队采用面向对象编程语言开发而成[12]。主要用于定向井、水平井、大位移井或深井超深井等复杂结构井钻井水力学设计、分析与优化，软件主要界面如下图 1 所示。软件主要特色为将井筒温压场与压力场、泥浆性能、岩屑运移进行了耦合求解，同时考虑了钻柱偏心、旋转、接头等影响，适用于任意井身结构、任意钻具组合及任意井眼轨迹钻井。软件分析功能强大，可分析泥浆排量、密度、流变性、钻杆转速、机械钻速以及岩屑运移等各种因素对 ECD、循环压耗、温度场、岩屑运移、最小排量、最大排量、洗井时间、水力极限等水力参数的影响规律，帮助用户优化水力参数方案，保障钻井安全，提高钻井效率。

软件的核心理论模型为井筒复杂流动与传热耦合模型[13]，该模型基于流体传热学与动力学原理，考虑了井筒高温高压对泥浆性能的影响，同时考虑了岩屑运移对环空流动的影响[14]。其模型主要方程为：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} - p_f + \rho g \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p T v_z)}{\partial z} = q_i + q_e \quad (3)$$

式中, t 为时间, z 为沿井筒轴向位置; P 为轴向压力; T 为温度; ρ 为泥浆密度, 考虑了高温高压对泥浆密度和粘度的影响; v_z 为泥浆轴向速度; p_f 为轴向压耗, 对于钻柱内为管内压耗, 对于环空为环空压耗, 考虑了岩屑床等的影响; c_p 为泥浆的定压比热; q_i 为单位体积内的摩擦生热; q_e 为单位体积内的外部传入热, 如环空与钻柱内传热或者地层向环空传热。

以上为钻杆和环空的统一方程, 计算时要根据钻杆和环空分别展开。由于模型复杂, 具有强非线性, 需要采用数值解法编程求解。通过求解给定条件下的模型, 可以得到井筒温度场、压力场和泥浆性能分布, 再结合钻井水力学理论就可以进行各种水力参数计算、分析与优化。

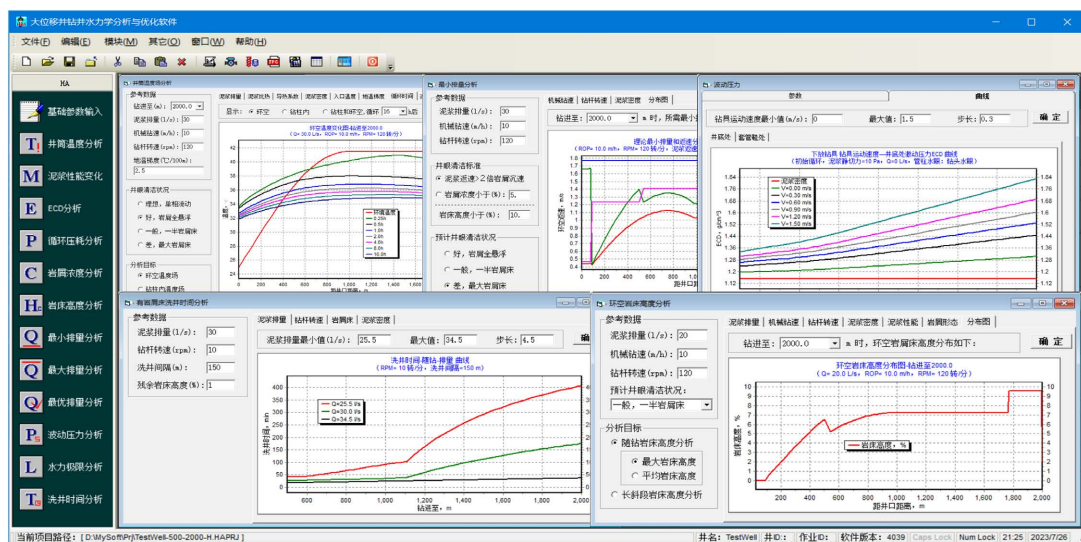


Figure 1. Diagram of hydraulics analysis and optimization software for extended reach drilling
图 1. 大位钻钻井水力学分析优化软件界面图

3. 钻井基本参数

威远位于四川盆地东南部, 是川南页岩气工区的重要组成部分, 威远区块页岩气井普遍采用三开井身结构, 一开 444.5 mm 井眼长约 1000 m, 主要为直井段; 二开 311 mm 井眼长约 2000 m, 主要为直井段和小斜度井段; 三开 215.9 mm 井眼长约 2000~3000 m, 主要为造斜段和水平段。其中, 三开井段钻井工艺复杂, 地层稳定性差, 长水平段钻井难度大, 因此, 本文主要针对三开井段进行分析。

影响井底压力和岩屑运移的因素有很多, 包括泥浆性能、钻进排量、钻杆转速、机械钻速等, 其中泥浆性对两者影响都很大, 因此, 本文主要结合威远某页岩气井数据分析泥浆性能对井底压力和岩屑运移的影响规律, 其它参数取默认值。具体参数为三开钻进前上部已固 220 mm 套管, 井段起深为 2998 m, 终深为 5608 m, 其中 2998~4100 m 为造斜段, 井斜角从 0°变化到 90°, 之后保持为水平段。泥浆入口密度变化范围为 1.65~1.90 g/cm³, 随井深增加而增加。默认钻进排量为 30 L/s, 机械钻速为 5 m/h, 钻杆转速为 80 r/min, 钻杆采用 139.7 mm 和 127 mm 复合钻杆。

4. 计算结果与讨论

4.1. 泥浆性能沿井筒变化

描述泥浆性能的参数有很多，其中影响井筒流动的主要是泥浆密度和流变参数，流变参数可以用泥浆流动时的有效粘度表征。目前现场计算主要采用地面测量值，实际上，在井筒不同深度处，由于温度和压力影响，泥浆密度和泥浆流变参数都会发生变化，采用地面值计算会产生一定误差[13]。

温度和压力对泥浆密度和有效粘度的影响如下所示。从图2和图3中可以看出，随压力增加和温度减小，泥浆实际密度和有效粘度增加；考虑实际井筒温度和压力影响，环空实际泥浆密度和有效粘度均大于地面值，如图4和图5所示。

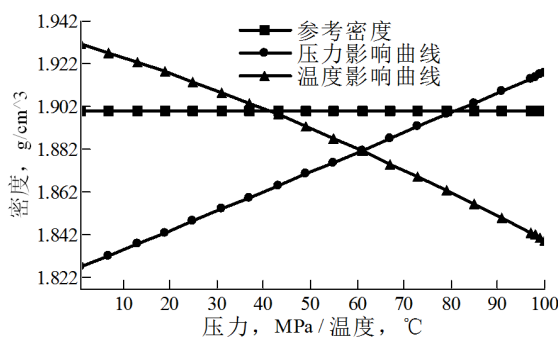


Figure 2. P & T vs mud density

图 2. 温度和压力对泥浆密度影响

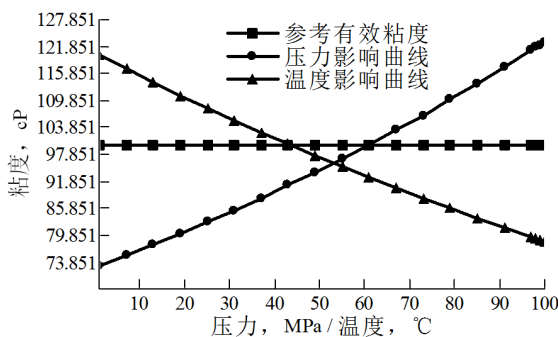


Figure 3. P & T vs mud viscosity

图 3. 温度和压力对泥浆有效粘度影响

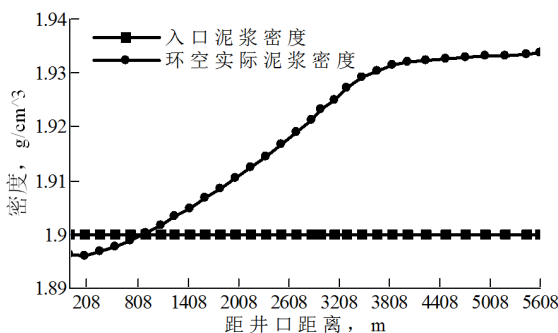


Figure 4. Actual mud density distribution in annular

图 4. 环空实际泥浆密度分布

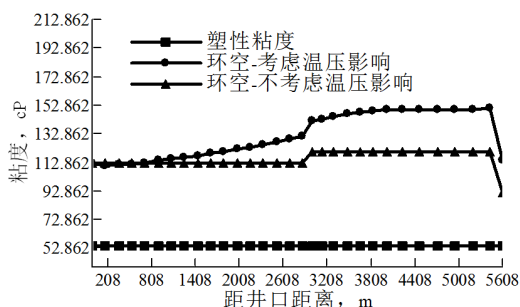


Figure 5. Actual mud viscosity distribution in annular
图 5. 环空实际泥浆有效粘度分布

4.2. 泥浆性能对井底压力影响

钻进时井底压力主要由泥浆自重和环空压耗组成，其中泥浆密度影响泥浆自重，泥浆排量、密度和有效粘度等影响环空压耗[14]。在钻井工程中，常以当量泥浆密度 ECD 表示压力，其计算公式为：

$$ECD = \rho_m + \frac{P_a}{gH} \tag{4}$$

式中， ρ_m 表示泥浆密度， kg/m^3 ； P_a 表示环空压耗，Pa； g 表示重力加速度； H 表示井底垂深，m。

泥浆性能参数对 ECD 的影响曲线如图 6~8 所示。从图中可以看出，随泥浆排量、密度和有效粘度增加，ECD 增加，反之则减小。

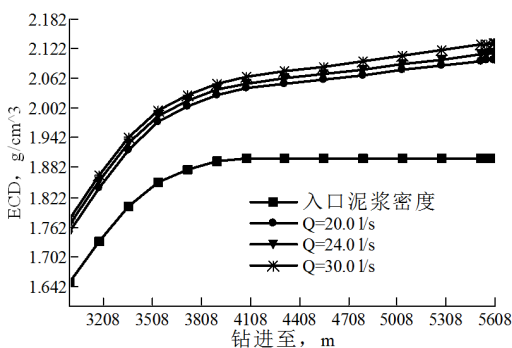


Figure 6. ECD with different hole depth and flow rate
图 6. 不同泥浆排量下随钻 ECD 变化

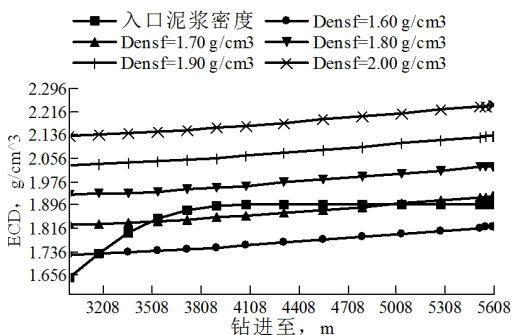


Figure 7. ECD with different hole depth and mud density
图 7. 不同泥浆密度下随钻 ECD 变化

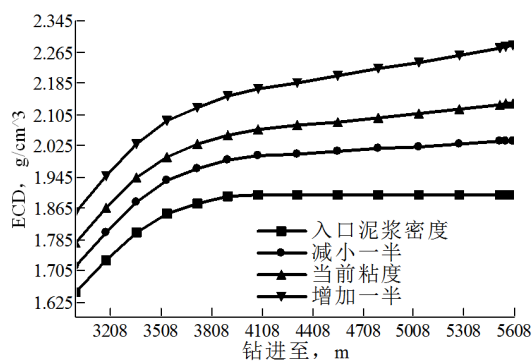


Figure 8. ECD with different hole depth and mud viscosity
图 8. 不同泥浆有效粘度下随钻 ECD 变化

4.3. 泥浆性能对岩屑运移影响

在斜井段，尤其是大斜度井段和水平段，岩屑由于重力作用会沉积在环空底部形成岩屑床[15]。过高的岩屑床会导致井底压力增加、井眼轨迹控制困难以及钻柱摩阻扭矩变大甚至卡钻等一系列复杂情况，因此，要注意合理设计泥浆性能与钻进参数，加大循环洗井或短起下频率等井眼清洁措施[16] [17]。

由于实际钻井排量大，钻柱转速高，环空无岩屑床。为了分析岩屑床分布变化规律，考虑最困难情况，将钻柱转速取为 0，泥浆性能参数对岩屑床高度 H_c 的影响曲线如图 9~11 所示。从图中可以看出，随泥浆排量、密度和有效粘度的增加，环空岩屑床高度减小，其中排量对岩屑床高度的影响最大。

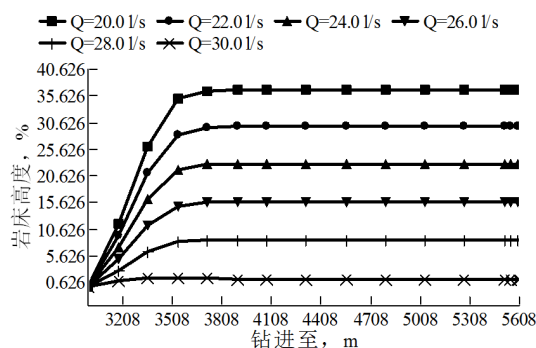


Figure 9. H_c with different hole depth and flow rate
图 9. 不同泥浆排量下环空岩屑床高度变化

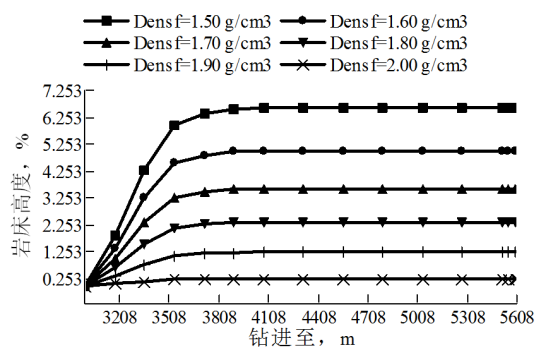


Figure 10. H_c with different hole depth and mud density
图 10. 不同泥浆密度下环空岩屑床高度变化

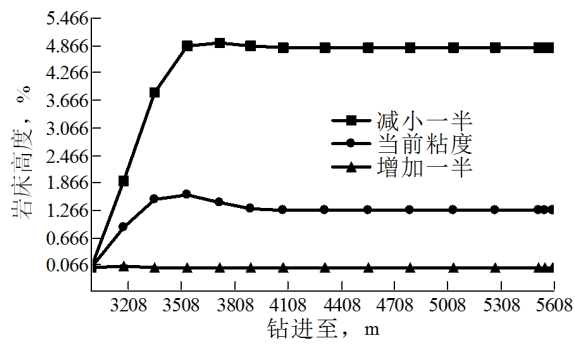


Figure 11. Hc with different hole depth and mud viscosity
图 11. 不同泥浆有效粘度下环空岩屑床高度变化

4.4. 最小排量设计

以直井段岩屑浓度小于 5%，斜井段岩屑床高度小于 10% 为井眼清洁标准[18]，计算得到的环空最小返速分布和最小排量分布如下所示。从图 12 中可以看出，在井筒不同位置处，所需的最小返速和排量都不完全相同。结合井眼轨迹数据，可以发现，随井斜角增加，需要的最小返速和排量均增加。该井段钻进保证井眼清洁所需的理论最小排量约为 21.6 L/s。不同机械钻速下随钻最小排量图如下所示，从图 13 中可以看出，随机械钻速增加，需要的最小排量增加。

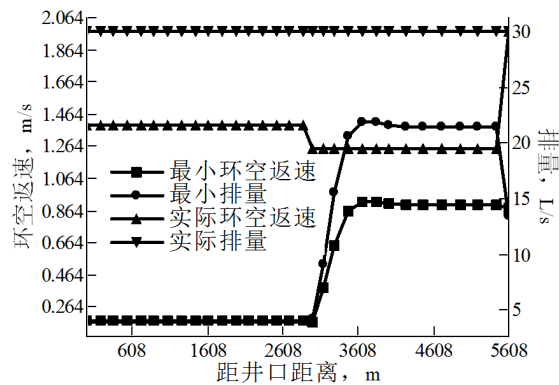


Figure 12. Minimum flow rate and velocity at 5608 m
图 12. 钻至 5608 m 时所需最小排量和环空返速图

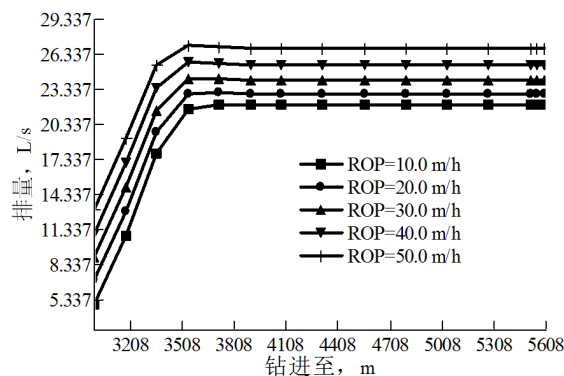


Figure 13. Minimum flow rate with different hole depth and ROP
图 13. 不同机械钻速下随钻理论最小排量变化

5. 结论

1) 随压力增加和温度减小, 泥浆实际密度和有效粘度增加; 考虑实际井筒温度和压力影响, 环空实际泥浆密度和有效粘度均大于地面值, 按照地面值计算将产生一定误差, 这在深井超深井、高温高压井或窄密度窗口井中可能带来安全隐患。

2) 随泥浆排量、密度和有效粘度增加, 井底 ECD 增加, 反之则减小, 其中泥浆密度影响最大, 在泥浆密度确定后, 可通过调节泥浆排量和流变参数控制井底 ECD 值。

3) 随泥浆排量、密度和有效粘度的增加, 环空岩屑床高度减小, 其中排量对岩屑床高度的影响最大, 应在设备和井壁稳定允许范围内尽量采用大排量钻进。

4) 随机械钻速增加, 钻进所需最小排量增加, 其中, 中等斜度井段携岩最困难, 所需最小环空返速和排量均比直井段和水平段大, 设计时要以中等斜度井段设计结果为依据。

参考文献

- [1] 伍贤柱. 四川盆地威远页岩气藏高效开发关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 1-9.
- [2] 刘伟, 白璟, 陈东, 张德军, 黄崇君. 川渝页岩气水平井水平段“一趟钻”关键技术与进展[J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 1-4.
- [3] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004.
- [4] 汪海阁, 刘岩生. 高温高压井中温度和压力对钻井液密度的影响[J]. 钻采工艺, 2000, 23(1): 56-60.
- [5] 鄢捷年, 李志勇, 张金波. 深井油基钻井液在高温高压下表观粘度和密度的快速预测方法[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 35-39.
- [6] 赵怀珍, 薛玉志, 李公让, 等. 抗高温水基钻井液超高温高压流变性研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(1): 5-9.
- [7] 唐林, 冯文, 伟王林. 井内及井壁瞬态温度的确定[J]. 钻井液与完井液, 1998, 15(5): 29-33.
- [8] 钟兵. 预测钻井过程中井内温度分布的新模型[J]. 西南石油学院学报(自然科学版), 1999, 21(4): 53-56.
- [9] 何世明, 尹成, 徐壁华, 等. 确定注水泥与钻井过程中井内循环温度的数学模型[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 42-45.
- [10] 王贵, 蒲晓林, 罗兴树, 等. 高温高压水基钻井液静态密度研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 97-99.
- [11] 赵胜英, 鄢捷年, 王利国, 等. 高温高压条件下钻井液当量静态密度预测模型[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 48-52.
- [12] 夏泊溲. 大位移钻井水力学分析优化系统及其应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018(8): 3-5.
- [13] 郭晓乐, 龙芝辉, 齐成伟. 井筒内泥浆性能变化对井筒压力计算的影响[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(11): 23-25.
- [14] 郭晓乐, 汪志明. 大位移井循环压耗精确计算方法研究与应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(5): 99-102.
- [15] 郭晓乐, 汪志明. 大位移井岩屑运移规律研究[C]//第二十届全国水动力学研讨会. 第二十届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 552-557.
- [16] 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研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 72-76.
- [17] 汪志明, 郭晓乐, 等. 南海流花超大位移井井眼净化技术[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(1): 4-8.
- [18] 郭晓乐, 汪志明. 大位移井水力参数设计方法[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5): 6-9.