

地热井钻井液对井壁温度分布的影响研究

胡童颖^{1,2}, 董向宇¹, 冉恒谦¹, 任启伟¹, 高鹏举¹, 伍晓龙¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 地热井钻井作业时, 井深越大, 井眼温度越高, 给钻探施工造成的难度越大, 因此有必要研究井内循环温度分布。通过分析钻井液循环时热量传导过程, 利用井筒温度控制方程, 结合雄安新区地热井工程实例中的各项参数, 使用全隐式有限差分法求解方程, 求解井内钻井液循环时各部分的温度分布。且通过方程模拟研究了钻井液的密度、粘度、排量等工程参数对井壁温度分布的影响, 结果表明: 钻井液密度、粘度、排量越大, 井壁温度越低, 井底附近的井壁温度降低幅度越大, 其中钻井液的排量改变对井壁温度分布的影响最大。模拟研究结果对于现场施工设计有一定的参考价值。

关键词: 地热井; 钻井液; 井筒温度分布; 离散化; 工程参数; 雄安新区

中图分类号: P634.6; P314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)01-0020-06

Study on influence of drilling fluids on temperature distribution over the borehole wall in geothermal wells

HU Tongying^{1,2}, DONG Xiangyu¹, RAN Hengqian¹,
REN Qiwei¹, GAO Pengju¹, WU Xiaolong¹

(1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In geothermal well drilling, borehole temperatures increase with depths, making drilling more difficult. Therefore, it is necessary to study the circulation temperature distribution in the well. With analysis of the heat conduction process during drilling fluid circulation, and in view of various thermal well parameters in Xiongan New Area, the wellbore temperature control equation is adopted, and the fully implicit finite difference method is used to solve the equation to find the temperature distribution over each well section during drilling fluid circulation in the well. The influence of the drilling fluid density, viscosity and displacement on the wellbore temperature distribution is studied by equation simulation. Results show that the higher the drilling fluid displacement, density or viscosity is, the lower the wall temperature is; and the more the wellbore wall temperature near the bottom decreases. The displacement change of drilling fluid has the greatest influence on the borehole wall temperature distribution. The results of the simulation study provide some reference for the drilling design.

Key words: geothermal wall; drilling fluid; wellbore temperature distribution; discretization; engineering parameter; Xiongan New Area

0 引言

地热能源作为国家大力提倡发展的新能源, 和煤、石油、天然气等化石能源相比, 具有清洁、安全、绿色、环保等特点。我国地热资源极为丰富, 自然资源部发布的官方数据显示, 我国的地热资源潜力接近全球的 8%^[1-5]。因此, 地热开发利用也越来越被人们所重视, 而钻探在地热勘探、开发过程中作为

主要的技术手段发挥着相当大的作用^[6]。

井内温度过高是地热钻井中遇到的主要问题。钻井液循环过程中的温度分布影响着井内压力平衡, 也关系到钻井安全、固井封井质量和井壁的稳定, 甚至对电法测井解释及热储层的压裂、地热的开采都有一定程度的影响, 在钻完井过程中不容忽视。因此, 研究地热井井内的温度分布对于安全快速钻

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2019-12-18 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.01.004

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“雄安新区地热资源调查评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20189115)

作者简介: 胡童颖, 男, 汉族, 1996 年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 主要从事地热井钻井施工工艺研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, 1923781098@qq.com。

引用格式: 胡童颖, 董向宇, 冉恒谦, 等. 地热井钻井液对井壁温度分布的影响研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 20-25.

HU Tongying, DONG Xiangyu, RAN Hengqian, et al. Study on influence of drilling fluids on temperature distribution over the borehole wall in geothermal wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 20-25.

进具有重要意义。20 世纪 60 年代起, Ramey^[7] 提出了井筒传热时的总传热系数。Schoepel R. J. 等^[8]建立了井内各部分温度的控制方程并计算了温度分布。钟兵等^[9]建立了钻井时井内流动传热过程的一维非稳态数值模型, 提出钻井液的热物性、入口温度、循环排量、地温梯度等因素对井内温度的准确预测至关重要。Mou Yang 等^[10]研究了钻井液径向温度梯度对井筒温度的影响, 提出钻井液径向温度梯度对井筒温度影响很小, 在建模计算时可忽略。

本文的目的是为了研究钻井液循环时井筒及周围井壁的温度分布, 通过使用全隐式有限差分法求解温度控制方程, 推导井内钻柱内、环空内钻井液与井壁的温度分布, 目的是准确表征出井内钻井液与周围地层的动态热量交换过程。在此基础上改变施工时钻井液的工程参数, 分析钻井液工程参数的变化对井壁温度分布造成的影响, 给现场施工提供一定的参考价值。

1 井筒温度分布模型

1.1 传热过程分析

在常规钻井过程中, 钻井液通过钻井泵泵入钻杆柱, 再流经钻头进入环空, 在井底混合岩屑后沿环空上返至地面, 如图 1 所示。在此过程中, 钻井液开始进入钻杆柱内时, 温度比环空和周围地层低, 会从环空及周围地层中吸热; 钻井液进入环空后, 温度高于钻杆柱的钻井液低于周围地层温度, 地层的热量就沿着指向井眼轴线的方向传递至钻杆柱内。

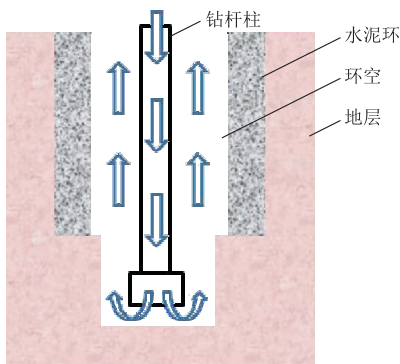


图 1 钻井液循环时的井筒简化模型

Fig.1 Simplified wellbore model for drilling fluid circulation

钻井液在不同阶段的温度取决于不同的热交换过程, 并受不同方向的传热速率影响^[11]。在第一阶段, 低

$$A_A \rho V_A C_p \frac{\partial T_A(z, t)}{\partial z} + 2\pi r_D U [T_D(z, t) - T_A(z, t)] + 2\pi r_w h_f [T_f(r_w, z, t) - T_A(z, t)] = -\rho A_A C_p \frac{\partial T_A(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

温钻井液进入钻杆柱, 并向下循环至钻头底部, 换热过程由环空钻井液与钻杆壁的对流传热、钻杆壁的导热、钻杆壁与钻柱内钻井液的对流传热 3 部分组成。该阶段中钻井液温度的变化由其向下的热对流速率和环空钻井液、钻杆壁、钻柱内钻井液的径向传热速率决定。在第二阶段, 钻杆柱出口的钻井液温度逐渐等于环空入口的钻井液温度。在第三阶段, 环空内钻井液向上循环, 其温度取决于沿环空向上的热对流速率, 环空钻井液、钻杆壁和钻柱内的钻井液之间的径向传热速率, 环空钻井液通过井壁的对流传热速率^[12]。

因此, 为了准确计算钻井液的循环温度, 必须同时考虑钻杆柱内液体、钻杆壁、环空内钻井液和地层间的能量平衡。通过建立能量平衡方程组, 并采用全隐式有限差分法求解, 最后得到钻井液的循环温度表达式。

1.2 假设条件

当钻进过程中钻井液循环时间足够长, 且钻井液的流量和密度基本不变时, 整个井筒系统的温度会趋于稳定^[13-14], 据此作出如下假设:

(1) 钻井液不可压缩, 密度、导热系数、比热容不随温度变化而变化;

(2) 岩石的密度、比热容和导热系数不随温度变化而变化, 且比热容和导热系数在垂向和水平方向是相等的;

(3) 钻杆与环空尺寸与地层空间相比非常小, 可假设钻杆内和环空内的流体是一维非稳态传热;

(4) 考虑地层中仅有热传导(垂向和水平), 岩石内部的对流和热源不予考虑。

1.3 井筒温度控制方程

沿轴向方向将井筒划分为若干个控制单元。对于每个控制单元, 沿井筒径向方向, 分别以钻杆内流体、环空内流体、地层为研究对象, Schoepel R. J. 等^[8]建立的钻井液循环过程中井筒各部分温度控制方程如下:

(1) 钻杆柱内流体:

$$A_D \rho V_D C_p \frac{\partial T_D(z, t)}{\partial z} + 2\pi r_D U [T_D(z, t) - T_A(z, t)] = -\rho A_D C_p \frac{\partial T_D(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

(2) 环空内流体:

(3)地层内:

$$\frac{\partial T_f(r, z, t)}{\partial t} = c_h \nabla^2 T_f(r, z, t) \quad (3)$$

式中: z ——井深, m; ρ ——钻井液密度, g/cm^3 ; t ——钻井液循环时间, s; A_D, A_A ——分别为钻杆柱、环空的横截面积, m^2 ; V_D, V_A ——分别为钻杆柱、环空的体积, m^3 ; T_D, T_A ——分别为钻杆柱内、环空内钻井液温度, $^{\circ}\text{C}$; T_f ——地层温度, $^{\circ}\text{C}$; U ——钻杆柱、环空内钻井液之间通过钻杆壁的总对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; C_p, c_h ——分别为钻井液比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 、地层热扩散率; r ——控制单元到井眼轴线的径向距离, m; r_D, r_w ——分别为钻杆柱半径、井眼半径, m; h_f ——环空钻井液和地层间的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

1.4 初始条件和边界条件确定

(1)地层内, 钻柱内钻井液、环空内钻井液、井壁及周围地层的初始温度为原始地层静止温度, 即:

$$T_D(z, t=0) = T_A(z, t=0) = T_f(r, z, t=0) = T_{\infty}(z) \quad (4)$$

(2)钻杆柱入口和环空出口的钻井液温度可直接测量, 井口处有边界条件为:

$$T_D(z=0, t) = T_{in} \quad (5)$$

$$T_A(z=0, t) = T_{out} \quad (6)$$

$$\{A[T_D(i+1) - T_D(i-1)] + B[T_D(i) - T_A(i)]\}^{N+1} = C[T_D^{N+1}(i) - T_D^N(i)] \quad (10)$$

$$\{D[T_A(i+1) - T_A(i-1)] + B[T_D(i) - T_A(i)] + E[T_f(i, j) - T_A(i)]\}^{N+1} = F[T_A^{N+1}(i) - T_A^N(i)] \quad (11)$$

$$\{T_f(i, j+1) - (2+M)T_f(i, j) + T_f(i, j-1)\}^{N+1} = -MT_f^N(i, j) \quad (12)$$

其中:

$$A = \frac{A_D \rho V_D C_p}{2\Delta z}, B = 2\pi r_D U, C = \frac{-\rho}{\Delta t} A_D C_p, D = \frac{A_A \rho V_A C_p}{2\Delta z}, E = 2\pi r_w h_f, F = \frac{-\rho A_A C_p}{\Delta t}, M = e^{2\Delta r} r_w^2 \frac{1}{c_h} \frac{\Delta x^2}{\Delta t}$$

式中: i ——沿着井眼轴线方向的控制单元节点的横坐标; j ——沿井径方向的控制单元节点的纵坐标; N ——当前时间点; $N+1$ ——新的一个时间点。

2 工程实例分析

雄安新区地处于渤海湾盆地的冀中拗陷内, 主要涉及的构造单元有徐水凹陷、容城凸起、保定凹陷等。D12 地热井构造位置位于冀中拗陷容城凸起东部, 地表出露地层为第四系地层。D12 井处于雄安新区容城城区北偏西、津保铁路以南, 是一口地热勘探井, 完钻井深为 2608.5 m^[17-21]。

结合雄安 D12 井的现场实际数据, 求解钻井液循环过程中井筒及周围井壁的温度分布情况, 基本参数包括: 完钻井深 2608.5 m, 井底处原始地层测

(3)钻杆柱内流体和环空内流体在井底(即 $z=H$)处的温度相等即:

$$T_D(z=H, t) = T_A(z=H, t) \quad (7)$$

式中: H ——井底深度, m。

(4)可认为无穷远处的地层温度仅与埋藏深度有关, 不受钻井液循环时间的影响。

$$T_f(r_{\infty}, z, t) = T_{\infty}(z) \quad (8)$$

(5)在地层与环空流体的界面即井壁上, 流出地层与传入环空的热流量应相等^[15]。

$$2\pi r_w h_f [T_f(z, t) - T_A(z, t)] = 2\pi r_w k_f \left[\frac{\partial T_f(z, t)}{\partial r} \right]_{r=r_w} \quad (9)$$

式中: k_f ——地层内部岩石之间的径向导热系数, $\text{J}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

1.5 控制方程离散化

首先对控制方程(1)、(2)、(3)进行距离和时间的离散化。为保证稳定性, 对所有方程采用全隐式有限差分法, 即将方程中的所有未知量都使用后一时刻值来进行迭代处理, 从而形成代数方程组^[16]。然后求解离散化得到的代数方程组, 即可得到井筒温度控制方程的解。钻杆柱内流体、环空内流体和地层温度控制方程的离散格式分别如下所示:

井温度 70°C , 井眼半径为 76.2 mm, 钻杆规格采用 $\text{O}127$ mm 钻杆(内径 108.6 mm), 钻井液排量 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 。钻井液、地层岩石及钻杆柱的热物性数值如表 1 所示。

表 1 钻井液、地层及钻杆柱的热物性参数
Table 1 Thermophysical parameters of drilling fluid, formation and drill strings

名称	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$	比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$	粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
钻井液	1.10	0.58	4180	0.02
地层岩石	2.68	3.42	840	
钻杆柱	7.80	53.60	465	

图 2 为井内包括钻柱内钻井液、环空内钻井液的温度分布情况。图中原始地层温度为电法测井时实际测得的地层温度,环空内和钻杆内钻井液的温度是通过推导所得。即在确定合适的收敛精度后,通过反演的方法对控制方程(10)、(11)的 T_D 、 T_A 进行求解,以确定环空内钻井液和钻柱内钻井液随井深变化的温度曲线。

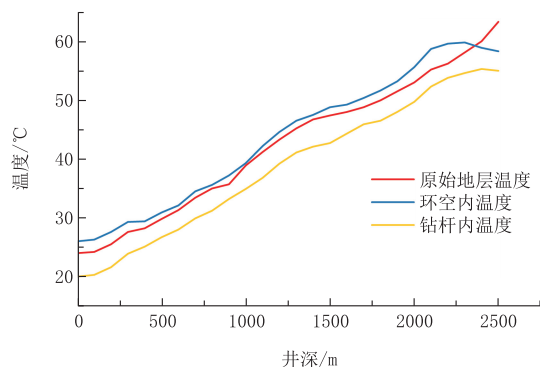


图 2 井内各部分温度随井深变化

Fig.2 Well temperature vs depth for each well section

从原始地层温度的曲线来看,地温梯度的变化呈现出忽高忽低的不规律态势,由原始地层温度推导得到的环空温度和钻杆内温度因此呈现出随井深增加不规律升高的规律^[22]。钻柱内钻井液温度表现为逐渐升高,是由于在钻井液向下运动时,不断吸收来自环空的热量,继而在井底 2500 m 处达到最高值。环空内钻井液温度表现为先不断升高,到达接近井底位置后逐渐平缓甚至下降。钻井液在向上运动过程中,温度一直比钻柱内温度高,不断向钻柱内传热;与此同时,在钻井液循环初期,刚流入环空内的钻井液温度比周围地层温度低,环空内钻井液会吸收来自地层的热量,但是随着循环时间的增加,流动的钻井液温度会超过地层温度,逐渐开始向地层传热。由图 2 可知,环空内钻井液温度最高点不在井底,最高温度位置约在井深 2200 m 处。

图 3 表示在不同的钻井液循环时间下,井壁温度分布随循环时间的变化情况。循环时间分别取 2、4、8 h,井壁温度的分布通过离散方程组推导得出。从图 3 中可以看出,在靠近井底的部分井段内,随着循环时间的延长,井壁温度随着循环时间的增加而降低;而在靠近井口的部分井段,井壁温度随着循环时间的增加而升高,且单位时间内温度变化幅度越来越小。在同一循环时间内,井壁温度随着井深变化先大幅升高后开始缓慢降低。井内钻井液循环 2 h

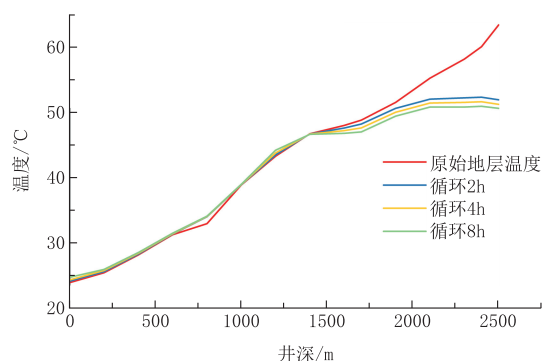


图 3 不同钻井液循环时间下井壁温度分布

Fig.3 Borehole wall temperature distribution at different circulation periods

后,井壁温度的最大值只有 52.5 °C,低于原始地层温度的最大值 63.3 °C,且该处井深不是井底位置。随着循环时间延长,井壁温度最大值呈现下降趋势。

常规钻井作业中,钻井液的密度、粘度、排量等工程参数经常需要调整,而工程参数的改变会影响井筒温度分布^[23]。井内钻井液的基本参数包括:钻井液排量 0.03 m³/s,密度为 1.10 g/cm³,粘度为 0.02 Pa·s。钻井液以 0.03 m³/s 排量在井内循环 2 h 后的井壁温度作为初始设定,在保证钻井液密度、粘度、循环时间不变的前提下,改变钻井液排量可得到井壁温度在不同排量值下的随井深分布曲线(见图 4)。

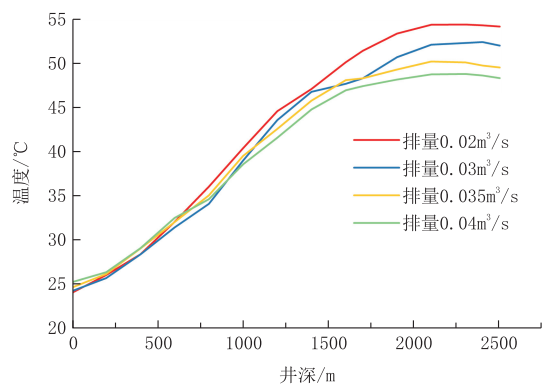


图 4 钻井液排量不同时的井壁温度分布

Fig.4 Borehole wall temperature distribution at different displacement of drilling fluid

由图 4 可知,随着钻井液排量的增大,井筒中上段的井壁温度变化程度不大,而靠近井底的位置,井壁温度明显降低。钻井液排量从 0.02 m³/s 增大到 0.04 m³/s,井眼处井壁温度下降 5.82 °C。这是由于钻井液排量增加会加快井筒内流体的传热过程,进而使得地层热量不断被循环流体带出井筒。

图 5 为钻井液密度不同时井壁温度的分布情况,密度分别为 1.10、1.20、1.30、1.40 g/cm³。容

易发现,钻井液密度越大,井底附近的井壁温度降低幅度越大。在井深 2500 m 处,钻井液密度为 1.40 g/cm^3 时,该位置的井壁温度取得最小值,相比初始设定时的井壁最高温度 51.9°C ,下降了 1.5°C ,说明钻井液密度变化对井壁温度的下降影响不大。

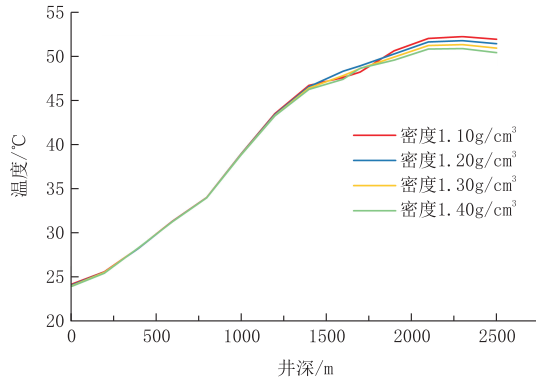


图5 钻井液密度不同时的井壁温度分布
Fig.5 Borehole wall temperature distribution at different density of drilling fluid

图6为钻井液粘度不同时井壁温度的分布情况,粘度分别取 0.02 、 0.03 、 0.04 、 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。容易发现钻井液粘度对井壁温度的影响与密度类似,随着钻井液粘度增大,井内靠近井眼的位置井壁温度降低幅度越大。在井深 2500 m 处,钻井液粘度为 0.02 和 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,温差为 3.2°C ,钻井液粘度对井壁温度分布影响较大。可推测,在钻井液排量为 $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$,密度为 1.40 g/cm^3 ,粘度为 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,钻井液循环时间足够长时,井底位置的井壁温度将达到最低值。

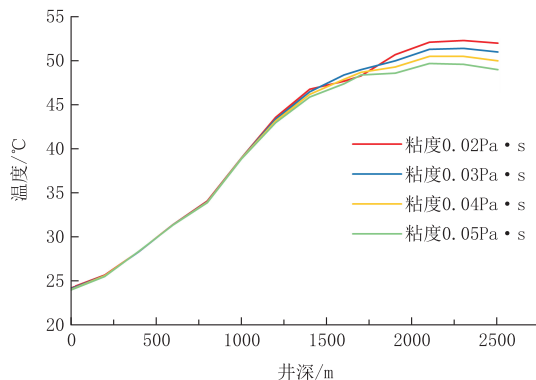


图6 钻井液粘度不同时的井壁温度分布
Fig.6 Borehole wall temperature distribution at different viscosity of drilling fluid

3 结果讨论

通过在控制方程中改变钻井液排量、密度、粘度等参量来模拟改变井壁温度分布,可知这些工程参数

对靠近井底位置的井壁温度影响较大,而靠近井口与井筒中部的部分井段井壁温度影响较小。钻井液的排量、粘度、密度越大,井底附近的井壁温度降低幅度越大,其中排量改变对井壁温度分布影响最为明显。

钻井液在循环一段时间后,井壁温度会降低;但停钻之后,井壁温度又会逐渐恢复至原始地层温度,井壁上的岩石由于温度升高容易发生延迟破坏,井壁容易出现垮塌^[23-25]。一旦钻井液密度、排量、粘度较大,井眼温度下降幅度过大,井壁垮塌的可能性就更高。

4 结论

(1) 钻杆柱内钻井液在向下流动过程中温度逐渐升高,会在井底的位置取得最高值;环空内钻井液在向上流动过程中开始时温度逐渐升高,循环足够时间后,环空内钻井液温度随井深先升高后下降。

(2) 在钻井液开始循环阶段,井内钻井液温度逐渐升高,井壁温度逐渐降低。随着循环时间延长,其中井壁温度的降低速度逐渐减小。

(3) 在研究影响地热井井壁温度的工程参数密度、粘度、排量时,发现井壁温度变化主要集中在井底及附近的部分井段。钻井液的工程参数取值越大时,靠近井底位置的井壁温度降低程度越明显,其中排量增加对井壁温度的影响最大。

(4) 地热井中钻井液停止循环后,井壁岩石温度会逐渐恢复至原始地层温度,温度升高过程中井壁岩石易发生破坏。需严格控制钻井液的密度、排量、粘度等参数,以免井眼温度下降幅度过大致使井壁垮塌。

参考文献(References):

- [1] 刘波.地热井开发现状分析及前景展望[J].石化技术, 2015(4):153.
LIU Bo. Analysis and prospect of geothermal well development [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015(4):153.
- [2] 许刘万,伍晓龙,王艳丽,等.我国地热资源开发利用及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2013,40(4):1-5.
XU Liuwan, WU Xiaolong, WANG Yanli, et al. Exploitation and utilization of geothermal resources and drilling technology in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(4):1-5.
- [3] 卢予北.地热井常见主要问题分析与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(2):43-47.
LU Yubei. Analysis and research on common problems of geothermal wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(2):43-47.
- [4] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究

- [J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the new era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):1-8.
- [5] 张伟.高温岩体热能开发及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):219-224.
ZHANG Wei. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):219-224.
- [6] 陈建兵,王振福.关中盆地地热钻井施工常见问题预防及处理方法探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):21-27.
CHEN Jianbing, WANG Zhenfu. Prevention and treatment of common problems in geothermal drilling in Guanzhong Basin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):21-27.
- [7] Ramey H.J. Wellbore heat transmission[J]. Journal of Petroleum Technology, 1962,14(4):427-435.
- [8] Schoepfel R.J., Bennett R.E. Numerical simulation of borehole and formation temperature distributions while drilling to total depth[J]. Society of Petroleum Engineers, 1971,3364:1-6.
- [9] 钟兵,方铎,施太和.井内温度影响因素的敏感性分析[J].天然气工业,2000,20(2):57-60.
ZHONG Bing, FANG Duo, SHI Taihe. Sensitivity analysis of borehole temperature influence factors[J]. Natural Gas Industry, 2000,20(2):57-60.
- [10] Mou Yang, Yingfeng Meng, Gao Li, et al. Estimation of wellbore and formation temperatures during the drilling process under lost circulation conditions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(5):43-54.
- [11] 王江帅,李军,柳贡慧,等.循环钻进过程中井筒温度场新模型[J].断块油气田,2018,25(2):240-243.
WANG Jiangshuai, LI Jun, LIU Gonghui, et al. New model of wellbore temperature field during drilling process [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018,25(2):240-243.
- [12] 王博.深水钻井环境下的井筒温度压力计算方法研究[D].北京:中国石油大学,2007.
WANG Bo. Research on the method of wellbore temperature and pressure calculation during deep-water drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.
- [13] 朱明,段友智,姚凯,等.基于温度场模型的地热井完井管柱结构优化[J].科学技术与工程,2015,15(22):29-32.
ZHU Ming, DUAN Youzhi, YAO Kai, et al. Optimization of completion string structure in geothermal well based on temperature field model[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(22):29-32.
- [14] 郭晓乐,龙芝辉,汪志明,等.深水隔水管钻井井筒温压场耦合计算与分析[J].中国海上油气,2014,26(6):66-69.
GUO Xiaole, LONG Zhihui, WANG Zhiming, et al. Study on coupling law of wellbore temperature and pressure fields in deep water drilling with riser system[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014,26(6):66-69.
- [15] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,2007.
YANG Shiming. Heat transfer[J]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [16] 文乾彬,邵传辉,刘勇,等.钻井过程中钻井液循环温度数值模拟[J].新疆石油天然气,2011,7(4):28-32.
WEN Qianbin, SHAO Chuanhui, LIU Yong, et al. Numerical simulation of circulating temperature of drilling fluid during drilling[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011,7(4):28-32.
- [17] 杜焱森,宋志彬,和国磊,等.天津东丽湖 CGSD-01 井取心问题及技术探索[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(3):13-19.
DU Yaosen, SONG Zhibin, HE Guolei, et al. Core drilling in Well CGSD-01 in Tianjin Dongli Lake[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(3):13-19.
- [18] 李进安.内蒙古哈素海地热井施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):55-57.
LI Jin'an. Construction technology of Hasuhai geothermal well in Inner Mongolia[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):55-57.
- [19] 吕天奇,张延军,于子望,等.地下水源热泵系统和太阳能辅助热源系统的地温场数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):79-83.
LÜ Tianqi, ZHANG Yanjun, YU Ziwang, et al. Numerical simulation study on geothermal field of ground water heat pump system and solar assisted heat source system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(1):79-83.
- [20] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000 m 交流变频电驱岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40-46.
LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development and application of 4000m AC frequency-conversion core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):40-46.
- [21] 高鹏举,刘凡柏,王跃伟,等.4000 m 地质岩心钻机在天津东丽区地热资源调查中的示范应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):13-21.
GAO Pengju, LIU Fanbai, WANG Yuewei, et al. Demonstration application of 4000m geological core drilling rig in geothermal resources investigation in Dongli district of Tianjin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):13-21.
- [22] 李砚智,张长茂.GYx 地热井钻井液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):61-66.
LI Yanzhi, ZHANG Changmao. Drilling fluid technology for geothermal well GYx[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):61-66.
- [23] 张健,卢运虎.超深井筒温度分布及其对围岩力学性质的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2831-2839.
ZHANG Jian, LU Yunhu. Study on temperature distribution of ultra-deep wellbore and its effect on mechanical properties of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(S1):2831-2839.
- [24] 尹士兵,李夕兵,宫凤强,等.温压耦合作用下岩石动态破坏过程和机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2814-2820.
YIN Tubing, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. Study of dynamic failure processes and mechanism of rock subjected to coupling temperature and pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1):2814-2820.
- [25] 陈景涛,冯夏庭.高地应力下岩石的真三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1537-1543.
CHEN Jingtao, FENG Xiating. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(8):1537-1543.