

泥浆地面降温调控特深钻探 井筒泥浆温度的分析研究

郭威^{1,2}, 钟秀平^{1,2}, 贾瑞^{1,2}, 冯壕辛^{1,2}, 王元^{1,2},
张鹏宇^{1,2}, 雷江^{1,2}, 刘召^{1,2}, 王晓初^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对超万米特深钻探面临的超高温导致井下工具失效及泥浆性能恶化等关键挑战, 为明确泥浆地面降温技术的调控效果, 本文建立了井筒-地层耦合传热数值模型, 并结合牙哈501井实测数据对模型进行了验证。研究中以井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度为关键评价指标, 模拟分析了8000、11000、13000 m三种钻进深度时泥浆地面降温对井筒温度的调控规律。结果表明: 三种井深条件下, 使用泥浆降温后井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度分别降低了24.3、24.4 °C, 17.4、17.9 °C, 12.0、12.5 °C。不使用泥浆降温时, 三种井深条件下出井泥浆温度持续升高, 4次循环后分别可达92.3、96.2、94.3 °C, 使用泥浆降温后则均稳定在60 °C左右。本研究为特深钻探井筒温度控制与安全施工提供了理论依据和量化指导。

关键词: 特深钻探; 泥浆地面降温; 井底泥浆循环温度; 井筒泥浆最高温度; 出井泥浆温度

中图分类号: P634; TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0028-09

Analysis of surface drilling fluid cooling for wellbore temperature regulation in extra-deep drilling

GUO Wei^{1,2}, ZHONG Xiuping^{1,2}, JIA Rui^{1,2}, FENG Haoxin^{1,2}, WANG Yuan^{1,2},
ZHANG Pengyu^{1,2}, LEI Jiang^{1,2}, LIU Zhao^{1,2}, WANG Xiaochu^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: To address the critical challenges in extra-deep drilling beyond 10000 meters, such as downhole tool failures and drilling fluid performance degradation caused by extreme high temperatures, this study investigates the efficacy of surface cooling of drilling fluid. A numerical model of wellbore-formation coupled heat transfer was established and validated against measured data from Well Yaha 501. Using the bottom-hole circulating temperature, maximum drilling fluid temperature, and return drilling fluid temperature as key evaluation metrics, simulation analysis was conducted to examine the temperature control performance of surface cooling at designed depths of 8000 m, 11000 m, and 13000 m. The results demonstrate that implementing surface cooling reduced the bottom-hole circulating temperature and maximum drilling fluid temperature by 24.3 °C & 24.4 °C, 17.4 °C & 17.9 °C, and 12.0 °C & 12.5 °C, respectively. Without cooling, the return drilling fluid temperature after four circulation cycles reached 92.3 °C, 96.2 °C, and 94.3 °C. In contrast, with surface cooling, it stabilized at approximately 60 °C. This study provides a theoretical basis and quantitative guidance for wellbore temperature control and safe operations in extra-deep drilling.

收稿日期: 2025-10-25; 修回日期: 2025-10-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.003

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号: 2024ZD1000800、2024ZD1000803); 国家重点研发计划(编号: 2022YFC2806402)

第一作者: 郭威, 男, 汉族, 1979年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 从事非常规地质能源钻采理论与关键技术研究及教学工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, guowei6981@jlu.edu.cn。

引用格式: 郭威, 钟秀平, 贾瑞, 等. 泥浆地面降温调控特深钻探井筒泥浆温度的分析研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 28-36.

GUO Wei, ZHONG Xiuping, JIA Rui, et al. Analysis of surface drilling fluid cooling for wellbore temperature regulation in extra-deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 28-36.

Key words: extra-deep drilling; surface drilling fluid cooling; bottom-hole circulating temperature; maximum wellbore drilling fluid temperature; return drilling fluid temperature

0 引言

超万米特深科学钻探是获取地球内部信息最直接和最重要的手段,地层超高温是特深钻探面临的关键挑战之一^[1-2]。深地塔科1井设计井深11100 m,完钻井深10910 m,井底温度超过220℃,出现了井下仪器元器件、密封材料失效的问题^[3]。按地温梯度3℃/100 m、地面温度20℃计算,13000 m井深的地层温度超过400℃。地层高温会导致钻完井工具和井下仪器失效和性能恶化^[4-6],加速泥浆处理剂失效,从而导致泥浆流变、滤失和封堵等核心性能失控^[7-9]。

泥浆地面降温是降低井筒泥浆温度的关键技术,现有研究表明,泥浆地面降温能够显著降低井筒泥浆温度^[10-16],井筒泥浆温度分布数值模拟的分析研究也取得了显著进展^[17-25]。但泥浆地面降温对超万米特深钻探井筒泥浆温度的分布规律和调控效果尚不清晰。

针对上述问题,本研究建立了特深钻探井筒泥浆温度分布的数值模型。以井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度为指标,分析了泥浆地面降温对特深钻探井筒泥浆温度的影响规律,确定了泥浆地面降温对井筒泥浆温度的调控效果。

1 特深钻探井筒泥浆温度分布数值模型

1.1 井筒泥浆的传热过程

正循环钻进过程中,泥浆进入钻柱中心通道,向下流动至钻头,经钻头水眼流出后进入环空上返至地面。泥浆循环过程中,井筒的传热过程包括:(1)钻柱中心通道泥浆流动引起的轴向对流换热;(2)钻柱中心通道泥浆通过钻柱壁与环空泥浆的传导换热;(3)环空内泥浆流动引起的轴向对流换热;(4)环空内泥浆通过套管、固井水泥环与地层的传导换热。特深钻探井筒泥浆的流动模型如图1所示(以四开钻进为例)。

1.2 假设条件

- (1)泥浆为单相不可压缩流体,不发生相态变化;
- (2)泥浆的密度、导热系数和比热容为定值;
- (3)钻柱中心通道和环空内泥浆仅考虑轴向传热,忽略径向温度梯度;
- (4)井筒周围的地层为各向同性均质地层;

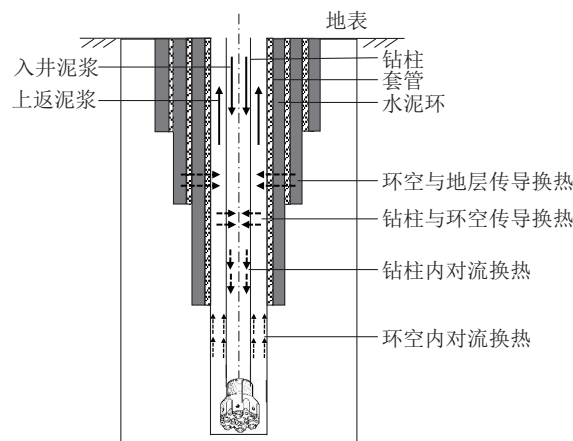


图1 特深钻探井筒泥浆的流动模型

Fig.1 Flow model of drilling fluid in the extra-deep exploration wellbore

(5)距离井筒足够远处,地层温度始终为初始地层温度。

1.3 井筒泥浆的传热模型

1.3.1 钻柱中心通道泥浆传热模型^[24]

钻柱中心通道泥浆体积单元的能量变化主要由3个部分组成,即泥浆流动引起的能量变化、泥浆径向流动引起的对流换热、泥浆通过钻柱壁与环空泥浆间的传导换热。由此,得到钻柱中心通道泥浆的能量控制方程:

$$c_d \rho_d \frac{\partial T_p}{\partial t} = v_p c_d \rho_d \frac{\partial T_p}{\partial z} + \frac{U_{p-a}}{A_p} (T_a - T_p) \quad (1)$$

式中: c_d ——泥浆比热容; ρ_d ——泥浆密度; T_p ——钻柱中心通道泥浆温度; t ——时间; v_p ——钻柱中心通道泥浆流速; z ——深度; U_{p-a} ——钻柱中心通道泥浆与环空内泥浆的总换热系数; A_p ——钻柱截面积; T_a ——环空内泥浆温度。

1.3.2 环空内泥浆传热模型

环空内泥浆体积单元的能量变化主要由3个部分组成,即泥浆流动引起的能量变化、泥浆径向流动引起的对流换热、泥浆经套管和固井水泥环与地层间的传导换热。由此,得到环空内泥浆的能量控制方程:

$$c_d \rho_d \frac{\partial T_a}{\partial t} = -c_d \rho_d v_a \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{U_{p-a}}{A_a} (T_p - T_a) + \frac{U_{a-f}}{A_a} (T_f - T_a) \quad (2)$$

式中: v_a ——环空内泥浆流速; A_a ——环空截面积; U_{a-f} ——环空内泥浆与地层的总换热系数; T_f ——地层的温度。

1.3.3 地层内的传热模型

$$c_u \rho_u \frac{\partial T_f}{\partial t} = k_u \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(k_u \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \quad (3)$$

式中: c_u ——地层比热容; ρ_u ——地层密度; k_u ——地层导热系数; r ——距离井筒中心的距离。

1.3.4 换热系数模型

采用热阻模型,分别计算钻柱中心通道和环空内泥浆的总换热系数,总换热系数由对流换热系数和传导换热系数共同决定。钻柱中心通道和环空内泥浆的总换热系数方程:

$$U_{p-a}^{-1} = \frac{1}{\pi d_{pi} h_p} + \frac{1}{2\pi k_{dp}} \ln \frac{d_{po}}{d_{pi}} + \frac{1}{\pi d_{po} h_a} \quad (4)$$

$$U_{a-f}^{-1} = \frac{1}{\pi d_{ao} h_a} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi k_{st}} \ln \frac{D_i}{d_i} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{2\pi k_{cem}} \ln \frac{D_j}{d_j} \quad (5)$$

式中: d_{pi} ——钻柱内径; h_p ——钻柱内对流换热系数; k_{dp} ——钻柱导热系数; d_{po} ——钻柱外径; h_a ——环空内对流换热系数; d_{ao} ——环空外径; k_{st} ——钢导热系数; D_i ——第 i 层套管外径; d_i ——第 i 层套管内径; k_{cem} ——固井水泥环导热系数; D_j ——第 j 层固井水泥环外径; d_j ——第 j 层固井水泥环内径。

1.4 初始条件与边界条件

1.4.1 初始条件

初始地层温度和泥浆温度在垂直方向按地温梯度线性分布:

$$T_f(z, t=0) = T_p(z, t=0) = T_a(z, t=0) = T_s + GH \quad (6)$$

式中: T_s ——地表温度; G ——地温梯度; H ——计算点距地表深度。

1.4.2 边界条件

井口处钻柱中心通道泥浆温度和泥浆入井温度相等:

$$T_p(z=0, t) = T_{in} \quad (7)$$

式中: T_{in} ——泥浆入井温度。

井底处钻柱中心通道和环空内泥浆温度相等:

$$T_p(z=H_{max}, t) = T_a(z=H_{max}, t) \quad (8)$$

1.5 模型验证

牙哈 501 井位于塔里木盆地塔北隆起轮台断隆牙哈断裂构造带中段偏西的牙哈 5# 构造, 井深 5360 m, 是塔里木油田开展的井底泥浆循环温度测试井, 温度数据记录详实、钻井工程参数全面^[26]。因此, 本文采用牙哈 501 井的实测数据进行模型验证。依据牙哈 501 井的井身结构参数、钻井工程参数和地层参数建立数值模型, 具体参数见表 1。

在裸眼和套管固井两种情况下, 对牙哈 501 井的实测井底循环温度与模型计算结果对比分析, 如图 2 所示。裸眼条件下, 泥浆循环 15 h 后, 实测井底循环温度为 84.86 °C, 模型计算为 83.42 °C, 绝对误差为 1.44 °C, 相对误差为 1.7%。套管固井条件下, 泥浆循环 10 h 后, 实测井底循环温度为 99.70 °C, 模型计算为 94.28 °C, 绝对误差为 5.42 °C, 相对误差为 5.4%。上述结果证明建立的数值模型具有较高的准确性。

2 特深钻探泥浆工程条件和温度评价指标

2.1 井身结构及相关材料的热物性参数

特深钻探预计井身结构如图 3 所示, 据此建立几何模型进行数值模拟。按照地温梯度 3 °C/100 m, 钻柱组合参数参照深地塔科 1 井^[27], 泥浆热物性参数源于室内实验测试, 地层热物性参数按饱水砂岩地层设置, 上述参数值见表 2。

2.2 泥浆流量和流速

根据绳索取心钻探工艺要求, 泥浆环空上返流速推荐范围为 0.5~1.5 m/s。参考工程案例, 特深钻探四开、五开和六开钻探井段, 泥浆流量和环空上返流速如表 3 所示。

2.3 井筒泥浆关键温度指标

井筒泥浆温度直接决定井下工具安全性、泥浆性能稳定性以及出井泥浆对地面装置密封性的影响。关键温度指标包括: (1) 井底泥浆循环温度, 决定井下工具能否满足工作温度要求。目前, 多数井下工具的最高工作温度为 150 °C, 高温井下工具额定工作温度为 175 °C^[28]。(2) 井筒泥浆最高温度, 决定了高温下泥浆的流变性能是否满足钻探工艺要求。在环空泥浆从井底上返至井口的过程中, 上返初期地层对环空上返泥浆持续加热, 环空泥浆温度继续升高。随着地层温度的逐渐降低, 环空泥浆温度也逐

表 1 牙哈 501 井的井身结构参数、钻井工程参数和地层参数		
Table 1 Wellbore structure, drilling engineering, and formation parameters of Well Yaha 501		
参 数	数值	
一开钻头尺寸/mm	660.4	
一开套管外径/mm	508.0	
一开套管内径/mm	482.6	
一开深度/m	250	
二开钻头尺寸/mm	444.5	
二开套管外径/mm	338.6	
二开套管内径/mm	314.2	
二开深度/m	1500	
三开钻头尺寸/mm	311.2	
三开套管外径/mm	244.5	
三开套管内径/mm	220.5	
三开深度/m	4700	
四开钻头尺寸/mm	215.9	
四开套管外径/mm	177.8	
四开套管内径/mm	157.1	
四开深度/m	5358	
钻柱外径/mm	127.0	
钻柱内径/mm	108.6	
泥浆流量/(m ³ ·h ⁻¹)	87.26	
泥浆密度/(kg·m ⁻³)	1360	
泥浆比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	3440	
泥浆入井温度/℃	45	
泥浆导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	1.00	
泥浆动力黏度/(Pa·s)	0.041	
地表温度/℃	18	
地温梯度/[℃·(100 m) ⁻¹]	2.11	
地层比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	837.4	
地层密度/(kg·m ⁻³)	2675	
地层导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	2.42	
水泥导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	1.0	
钻柱/套管导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	45	

渐降低。因此,泥浆循环过程中的最高温度点出现在井底上方,且高于井底泥浆循环温度。目前,国内抗高温水基钻井液体系最高耐温 240 ℃左右^[29-32]。

(3)出井泥浆温度,决定了井口井控装置的密封性,温度过高会导致井控装置密封失效,额定温度为 82 ℃^[33]。井筒泥浆关键温度指标分析如图 4 所示。

井筒内泥浆温度不可超过这 3 个关键温度指

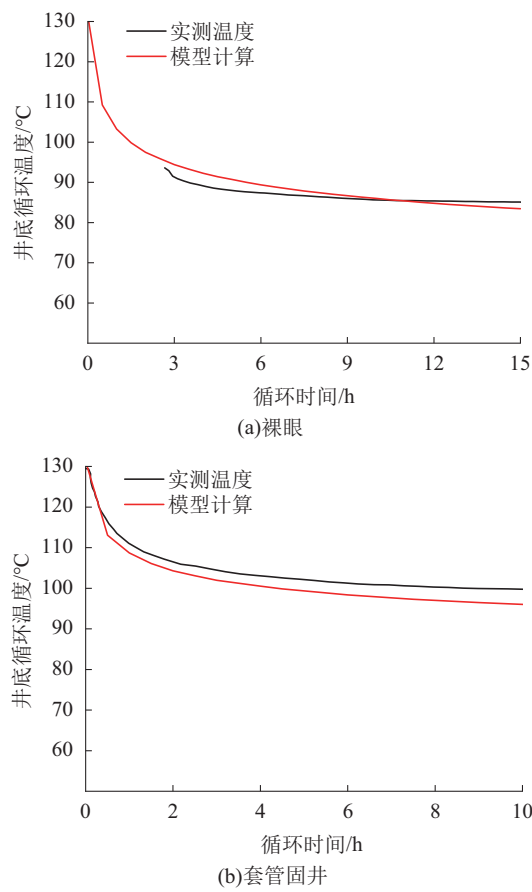


图 2 牙哈 501 井实测井底循环温度与模型计算对比
Fig.2 Comparison between measured bottom-hole circulating temperature and calculated from numerical model for Well Yaha 501

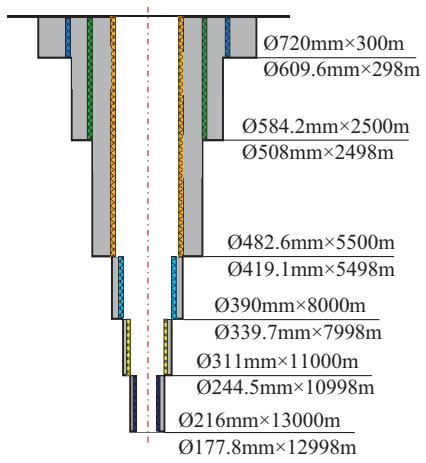


图 3 特深钻探预计井身结构
Fig.3 Proposed extra-deep wellbore structure

标。本文分别以井底泥浆循环最高温度 175 ℃、井筒泥浆最高温度 240 ℃和出井泥浆最高温度 82 ℃作为评价指标。

表2 钻柱参数、泥浆和地层热物性参数
Table 2 Parameters of the drill string, and thermophysical properties of the drilling fluid and formation

参 数	数值
四开钻柱内径/mm	122.3
四开钻柱外径/mm	142.3
五开钻柱内径/mm	103.9
五开钻柱外径/mm	123.5
六开钻柱内径/mm	100.6
六开钻柱外径/mm	120.1
四开研究井深/m	8000
五开研究井深/m	11000
六开研究井深/m	13000
地温梯度/ $[^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}]$	3.0
地层比热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	837.4
地层密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2675
地层导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	3.5
地表温度/ $^{\circ}\text{C}$	18
泥浆动力黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.03
泥浆密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1120
泥浆导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	1.00
泥浆比热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	3737
钻柱/套管导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	43.75
水泥导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	1

表3 四开至六开钻进时不同开次的环空泥浆流速
Table 3 Annular drilling fluid flow velocity at different hole sections during Spud 4~6 drilling

钻进开次	泥浆流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	井段	环空泥浆流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
四开	3000	一开至三开	0.46
		四开	0.78
五开	2400	一开至三开	0.35
		四开	0.49
		五开	0.98
六开	1800	一开至三开	0.26
		四开	0.37
		五开	0.74
		六开	1.46

3 泥浆地面降温对特深钻探井筒泥浆温度的调控效果

目前,井深8000 m的超深钻井工程已有大量的工程实例,便于对比验证泥浆地面降温的效果。深

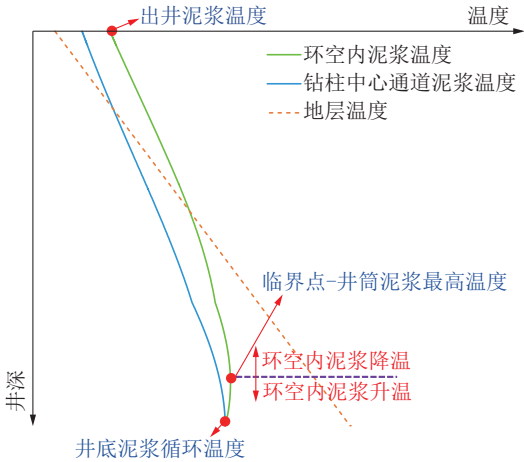


图4 井筒泥浆关键温度指标分析
Fig.4 Analysis of key temperature indicators of wellbore drilling fluid

地塔科1井完钻井深10910 m,是超万米特深钻探井的代表。井深13000 m是特深钻探后续的目标井深。因此,本文分别针对井深8000、11000、13000 m开展泥浆地面降温对井筒泥浆温度调控效果的分析。

3.1 井深8000 m时泥浆地面降温调控井筒泥浆温度分析

在使用与不使用泥浆地面降温两种情况下,对比分析泥浆多次循环下特深钻探井深8000 m时井筒泥浆温度分布。首先,根据泥浆流量和井身结构计算泥浆从井口流入至井底,再经环空上返至井口的时长,以此时长作为泥浆的单次循环时长。然后,采用前一次泥浆循环的计算结果作为下一次计算的初始值,进行迭代计算,从而模拟泥浆全循环过程。使用泥浆降温的情况,设定泥浆入井温度保持恒定值40℃。

在不使用泥浆地面降温的情况下,井深8000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图5所示。结果表明,泥浆循环4次后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度趋于稳定,分别为144.4、147.5℃。4次循环的出井泥浆温度分别为62.7、76.5、85.5、92.3℃。结果表明,泥浆经全孔循环3次后,出井泥浆温度超过了关键温度指标82℃。

使用泥浆地面降温的情况下,井深8000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图6所示。与不使用泥浆降温的情况不同,使用泥浆降温后,随泥浆循环次数的增加,深井段钻柱中心通道和环空内泥

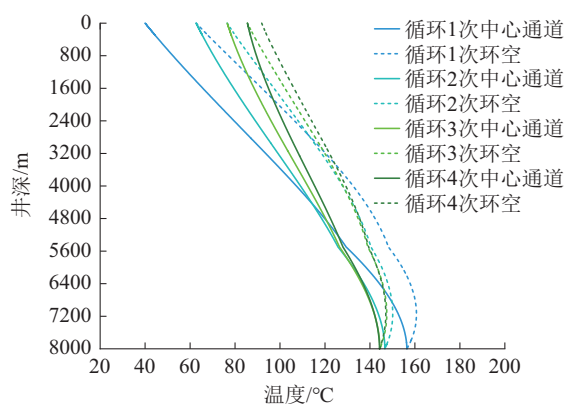


图5 井深8000 m不使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.5 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 8000
m without drilling fluid cooling

浆温度逐渐降低,泥浆循环10次后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度趋于稳定,分别为120.1、123.1℃。对比不使用泥浆降温,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别降低了24.3、24.4℃。使用泥浆地面降温后,出井泥浆温度保持稳定,约为57℃,远低于关键温度指标82℃,满足钻探工艺要求。

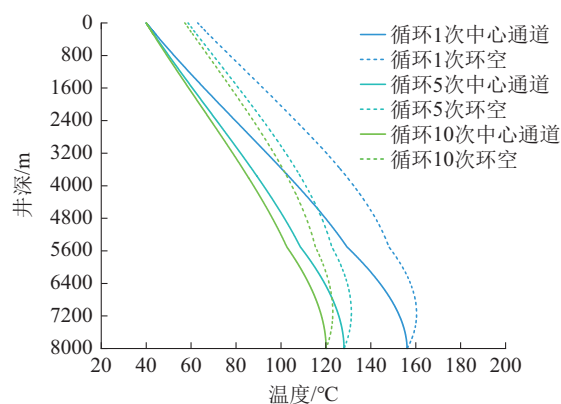


图6 井深8000 m使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.6 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 8000 m with drilling fluid cooling

3.2 井深11000 m时泥浆地面降温调控井筒泥浆温度分析

在不使用泥浆地面降温的情况下,井深11000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图7所示。与井深8000 m时相同,泥浆循环4次后,井底

泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度趋于稳定,分别达到231.1、233.2℃。4次循环的出井泥浆温度分别为62.9、78.1、88.6、96.2℃。

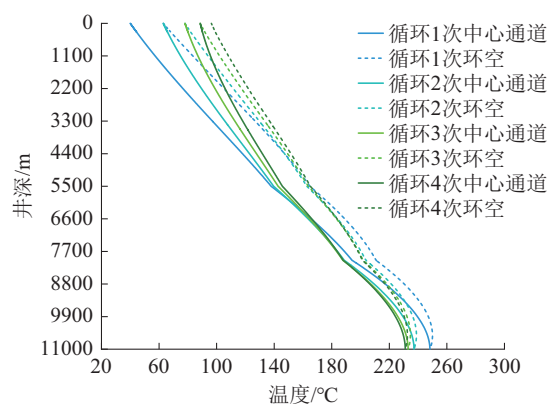


图7 井深11000 m不使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.7 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 11000 m without drilling fluid cooling

在使用泥浆地面降温的情况下,井深11000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图8所示。随泥浆循环次数增加,与井深8000 m时的井筒泥浆温度分布相似,井深11000 m时深井段钻柱中心通道和环空内泥浆温度同样逐渐降低,泥浆循环10次后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别稳定在213.7、215.3℃。对比不使用泥浆降温,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别降低了17.4、17.9℃。出井泥浆温度稳定在62℃。

3.3 井深13000 m时泥浆地面降温调控井筒泥浆温度分析

在不使用泥浆地面降温的情况下,井深13000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图9所示。与井深8000、11000 m时的泥浆温度分布规律相同,泥浆循环4次后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度趋于稳定,分别为321.5、322.3℃。出井泥浆温度变化规律与井深8000、11000 m时基本相近,4次循环的出井泥浆温度值分别为62.4、76.9、87.1、94.3℃。

使用泥浆地面降温的情况下,井深13000 m时钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图10所示。泥浆循环10次后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别稳定在309.5、309.8℃。对比不使用泥浆地面降温,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别

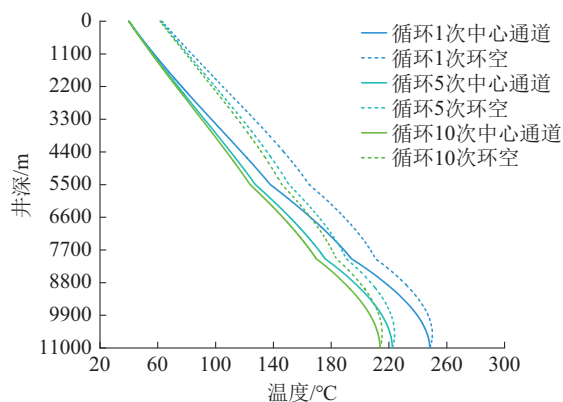


图8 井深11000 m使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.8 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 11000 m with drilling fluid cooling

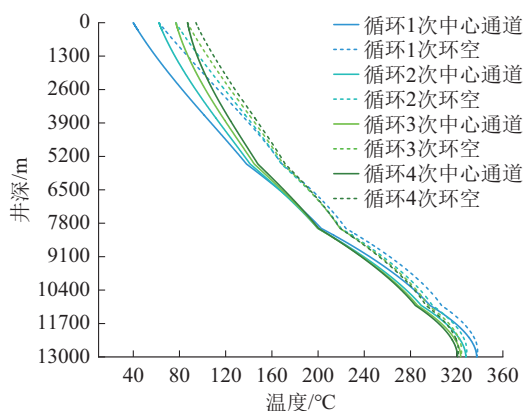


图9 井深13000 m不使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.9 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 13000 m without drilling fluid cooling

降低了12.0、12.5 °C。出井泥浆温度则基本稳定在63 °C。

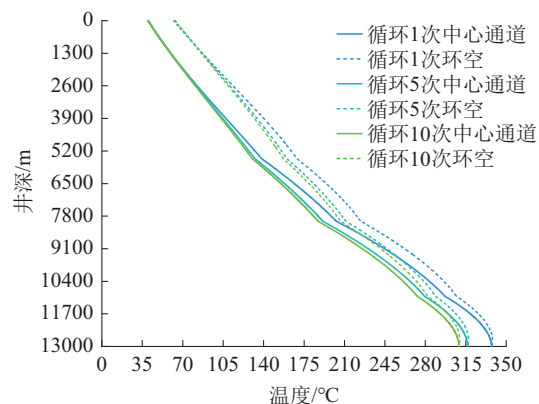


图10 井深13000 m使用泥浆降温钻柱
中心通道和环空内泥浆温度

Fig.10 Drilling fluid temperatures in the drill
string center channel and annulus at a well
depth of 13000 m with drilling fluid cooling

综上,对比井深8000、11000、13000 m时,使用泥浆降温与不使用泥浆降温的井筒泥浆关键温度变化规律,如表4所示。对于不同的井深,使用泥浆降温后,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度均得到了显著的降低,降低范围可达12.0~24.4 °C。随着井深的增加,泥浆地面降温系统对井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度的降幅逐渐减小。不使用泥浆降温的条件下,随泥浆循环次数的增加,对于不同的井深,出井泥浆温度均快速升高,4次循环后超过技术许用值82 °C。使用泥浆降温后,出井泥浆温度几乎不随循环次数增加而变化,温度值稳定在60 °C左右,比技术许用值低22 °C。

表4 使用与不使用泥浆降温不同井深的井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度

Table 4 Bottom-hole circulating temperature, maximum drilling fluid temperature and return drilling fluid temperature at different well depths with and without drilling fluid cooling

井深/m	井底泥浆循环温度/°C		井筒泥浆最高温度/°C		出井泥浆温度/°C	
	不使用泥浆降温	使用泥浆降温	不使用泥浆降温	使用泥浆降温	不使用泥浆降温	使用泥浆降温
8000	144.4	120.1	147.5	123.1	92.3	57.2
11000	231.1	213.7	233.2	215.3	96.2	61.6
13000	321.5	309.5	322.3	309.8	94.3	63.4

4 结论

(1)建立了特深钻探井筒泥浆温度分布数值模型,并通过牙哈501井的实测井底泥浆循环温度数

据进行了验证。在裸眼条件下,实测井底泥浆循环温度为84.86 °C,模型计算温度为83.42 °C,绝对误差为1.44 °C,相对误差为1.7%。套管固井条件下,

实测温度为99.70℃,模型计算温度为94.28℃,绝对误差为5.42℃,相对误差为5.4%,证明了模型的准确性。

(2)根据井下工具耐温极限、水基泥浆体系耐温极限和井控装置密封耐温极限,提出了井筒泥浆关键温度评价指标,分别为井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度。

(3)泥浆地面降温可显著降低特深钻探井筒泥浆温度。泥浆地面降温后,井深8000 m时井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别降低了24.3、24.4℃,降低率分别为16.8%、16.5%;井深11000 m时分别降低了17.4、17.9℃,降低率分别为7.5%、7.7%;井深13000 m时分别降低了12.0、12.5℃,降低率分别为3.7%、3.8%。不使用泥浆地面降温的条件下,不同井深经泥浆循环4次后出井泥浆温度均超过82℃。使用泥浆降温的条件下,不同井深的出井泥浆温度均稳定在60℃左右。

(4)在地温梯度3℃/100 m条件下,泥浆地面降温后井深13000 m时井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度均呈现超高温状态,应联合钻杆隔热技术进一步调控特深钻探井筒泥浆温度。

参考文献(References):

- [1] 邹长春,王成善,彭诚,等.中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议[J].现代地质,2023,37(1):1-14.
ZOU Changchun, WANG Chengshan, PENG Cheng, et al. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: perspectives and suggestions [J]. Geoscience, 2023, 37 (1): 1-14.
- [2] 黎然,李文哲,张佳寅,等.万米深井SDCK1井上部超大尺寸井眼钻井液技术[J].石油钻探技术,2024,52(2):93-99.
LI Ran, LI Wenzhe, ZHANG Jiayin, et al. Drilling fluid technology for Ultra-Large wellbore in the upper part of 10000-meter deep well SDCK1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (2): 93-99.
- [3] 孙金声,王建华.深地塔科1井钻井液技术[J].钻井液与完井液,2025,42(2):155-166.
SUN Jinsheng, WANG Jianhua. Drilling fluid technology for deep subsurface Tako-1 well [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2025, 42(2): 155-166.
- [4] 罗鸣,冯永存,桂云,等.高温高压钻井关键技术发展现状及展望[J].石油科学通报,2021,6(2):228-244.
LUO Ming, FENG Yongcun, GUI Yun, et al. Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6 (2): 228-244.
- [5] 李雅飞,李牧,郝围围,等.浅谈深井超深井钻井技术现状及对策[C]//2024油气田勘探与开发国际会议论文集I.西安:西安石油大学,2024:1065-1072.
LI Yafei, LI Mu, HAO Weiwei, et al. Current situation and countermeasures of deep and ultra-deep well drilling technology [C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development, Volume I. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024: 1065-1072.
- [6] 孙金声,杨景斌,白英睿,等.深层超深层钻井液技术研究进展与展望[J].石油勘探与开发,2024,51(4):889-898.
SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 889-898.
- [7] 赵冲.复杂深层高效油基钻井液关键技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
ZHAO Chong. Research on key technologies of the high-efficiency oil-based drilling fluids for complex deep formations [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [8] Davoodi S, Al-Shargabi M, Wood D A, et al. Synthetic polymers: a review of applications in drilling fluids [J]. Petroleum Science, 2024, 21(1): 475-518.
- [9] Espinosa-Paredes G, Garcia A, Santoyo E, et al. TEMLOPI/V.2: a computer program for estimation of fully transient temperatures in geothermal wells during circulation and shut-in [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(3): 327-344.
- [10] 李美春,丁扬,孙金声,等.井筒降温技术研究现状及未来展望[J].石油学报,2025,46(4):789-800.
LI Meichun, DING Yang, SUN Jinsheng, et al. Research progress and prospect of wellbore cooling technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(4): 789-800.
- [11] 章超,孙金声,黄贤斌,等.深井超深井钻井液降温技术研究进展及展望[J].工程科学学报,2025,47(6):1161-1174.
ZHANG Chao, SUN Jinsheng, HUANG Xianbin, et al. Research progress and prospect of cooling technology for drilling fluid in deep and ultra-deep wells [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(6): 1161-1174.
- [12] 朱浩铭,彭俊威,郝秦阳,等.钻井液冷却装置技术发展现状及展望[J].钻探工程,2024,51(2):8-14.
ZHU Haoming, PENG Junwei, XI Qinyang, et al. Technology development status and prospect of drilling fluid cooling equipment [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 8-14.
- [13] 李胜忠,张铜鏊,聂军,等.ZLZY310高温钻井液冷却系统研制及应用[J].石油机械,2022,50(8):46-51.
LI Shengzhong, ZHANG Tongyun, NIE Jun, et al. Development and application of ZLZY310 high temperature drilling fluid cooling system [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50 (8): 46-51.
- [14] 郝秦阳,彭俊威,戴启平,等.ZLQ030-75型高温钻井液冷却装置研制[J].石油矿场机械,2023,52(4):53-58.
XI Qinyang, PENG Junwei, DAI Qiping, et al. Development of ZLQ030-75 high temperature drilling fluid cooling device [J]. Oil Field Equipment, 2023, 52(4): 53-58.
- [15] 罗增,曹权,沈欣宇,等.钻井过程循环温度敏感性因素分析与应用[J].非常规油气,2021,8(5):93-99.
LUO Zeng, CAO Quan, SHEN Xinyu, et al. Analysis and ap-

- plication of circulating temperature sensitivity factors in drilling process[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(5):93-99.
- [16] 柳鹤, 于国伟, 于琛, 等. 基于地面降温的井下钻井液冷却技术[J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(6):756-764.
- LIU He, YU Guowei, YU Chen, et al. Study on downhole drilling fluid colling technology based on surface cooling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(6):756-764.
- [17] 宋洵成, 管志川. 深水钻井井筒全瞬态传热特征[J]. *石油学报*, 2011, 32(4):704-708.
- SONG Xuncheng, GUAN Zhichuan. Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep-water wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4):704-708.
- [18] Wu B S, Zhang X, Jeffrey R G. A model for downhole fluid and rock temperature prediction during circulation[J]. *Geothermics*, 2014, 50:202-212.
- [19] Satman A, Tureyen O I. Geothermal wellbore heat transmission: stabilization times for "static" and "transient" wellbore temperature profiles[J]. *Geothermics*, 2016, 64:482-489.
- [20] Yang M, Zhao X Y, Meng Y F, et al. Determination of transient temperature distribution inside a wellbore considering drill string assembly and casing program[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118:299-314.
- [21] 张政. 钻井过程中复杂工况下的井筒温度分布研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- ZHANG Zheng. Study on wellbore temperature distribution during drilling under complicated working conditions [D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2019.
- [22] 林日亿, 于程浩, 杨恒林, 等. 超深水平井钻井液循环温度场模拟计算与分析[J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(3):91-97.
- LIN Riye, YU Chenghao, YANG Henglin, et al. Temperature field simulation and analysis of drilling fluid circulation in super deep horizontal wells[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2022, 51(3):91-97.
- [23] 李忠慧, 赵毅, 楼一珊, 等. 海洋深水井钻井过程中井筒温度的变化规律[J]. *天然气工业*, 2019, 39(10):88-94.
- LI Zhonghui, ZHAO Yi, LOU Yishan, et al. Changing laws of wellbore temperature during offshore deepwater well drilling[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(10):88-94.
- [24] Wu Z Y, Xu L, Li B, et al. Hydrothermal coupling model between wellbore and permafrost for drilling in arctic cold regions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 235:126236.
- [25] 高永海, 尹法领, 张党生, 等. 水合物储层水平井钻井井筒-储层耦合模型与井壁稳定性分析[J]. *石油学报*, 2023, 44(7):1151-1166.
- GAO Yonghai, YIN Faling, ZHANG Dangsheng, et al. Wellbore-reservoir coupling model and borehole stability analysis of horizontal well drilling in hydrate reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(7):1151-1166.
- [26] 何世明, 尹成, 徐壁华, 等. 塔里木牙哈 501 井井下温度的现场实测研究[J]. *西南石油学院学报*, 2001, 23(5):50-53.
- HE Shiming, YIN Cheng, XU Bihua, et al. Field measurement studies of the temperature of Yaha501 well in Talimu[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2001, 23(5):50-53.
- [27] 王春生, 冯少波, 张志, 等. 深地塔科 1 井钻井设计关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(2):78-86.
- WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technologies for drilling design of well shendi take-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(2):78-86.
- [28] Wu Y X, Zhang Y F, Bettir N, et al. A comprehensive evaluation of drill pipe insulation for downhole temperature management using physics-based models[C]//50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2025:SGP-TR-202.
- [29] 许洁, 朱永宜, 乌效鸣, 等. 松科二井取心钻进高温钻井液技术[J]. *中国地质*, 2019, 46(5):1184-1192.
- XU Jie, ZHU Yongyi, WU Xiaoming, et al. High-temperature core drilling fluid technology of Well Songke-2[J]. *Geology in China*, 2019, 46(5):1184-1192.
- [30] 刘锋报, 孙金声, 王建华. 国内外深井超深井钻井液技术现状及发展趋势[J]. *新疆石油天然气*, 2023, 19(2):34-39.
- LIU Fengbao, SUN Jinsheng, WANG Jianhua. A global review of technical status and development trend of drilling fluids for deep and ultra-deep wells[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2023, 19(2):34-39.
- [31] 吴景华, 冯海涛, 谢俊革, 等. 中深地热井复杂地层钻进高温钻井液研制[J]. *钻探工程*, 2025, 52(5):61-66.
- WU Jinghua, FENG Haitao, XIE Junge, et al. Research and development of high-temperature drilling fluid for complex strata in deep geothermal wells[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(5):61-66.
- [32] 熊正强, 邹志飞. 耐 240 °C 超高温高密度钻井液探索性实验研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(4):74-81.
- XIONG Zhengqiang, ZOU Zhifei. Exploratory research on high-density drilling fluids with 240 °C ultra-high temperature resistance[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(4):74-81.
- [33] American Petroleum Institute (API). Specification for drill-through equipment: API specification 16A[S]. Washington: American Petroleum Institute, 2023.

(编辑 王跃伟)