

泥浆地面降温联合隔热钻杆调控特深钻探 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: 地层超高温是超千米科学钻探面临的核心挑战, 针对现有单一降温技术无法满足 13000 m 井筒控温需求的瓶颈, 采用数值模拟方法, 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评价指标, 研究了泥浆地面降温与隔热钻杆联合技术的控温效果。结果表明: 在 11000~13000 m 井段应用泥浆地面降温联合隔热钻杆可将井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度控制在 285、291、63 °C; 增加隔热钻杆的应用长度可有效降低井筒泥浆温度; 地温梯度每降低 0.1 °C/100 m, 井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度会同步降低 9 °C。研究表明, 泥浆地面降温联合隔热钻杆可将特深钻探井筒关键温度参数控制在安全范围内, 这不仅为超千米科学钻探钻井工程设计与科学选址提供重要的理论依据, 也为工程顺利实施提供了坚实的技术支撑。

关键词: 超千米科学钻探; 井筒降温; 隔热钻杆; 泥浆地面降温; 井筒泥浆温度; 数值模拟

中图分类号: P634; TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0037-07

Analysis of surface drilling fluid cooling combined with insulated drill pipe 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: Ultra-high formation temperature poses a core challenge for extra-deep scientific drilling. To address the bottleneck where existing single cooling technologies fail to meet the temperature control requirements of a 13000 m wellbore, this study employs numerical simulation to evaluate the cooling performance of a combined approach integrating surface drilling fluid cooling and insulated drill pipe, with bottom-hole circulating temperature, maximum wellbore drilling fluid temperature, and return drilling fluid temperature as evaluation indices. The results indicate that applying the combined technology from 11000 to 13000 m can control the bottom-hole circulating temperature, maximum wellbore drilling fluid temperature, and outlet drilling fluid temperature at 285 °C, 291 °C, and 63 °C, respectively. Increasing the application length of insulated drill pipes can effectively reduce wellbore drilling fluid temperatures, and for every 0.1 °C/100 m decrease in geothermal gradient, the bottom-hole circulating temperature and maximum wellbore drilling fluid temperature both decrease by 9 °C. This research demonstrates that the combined technology can control key temperature parameters within a safe range for extra-deep drilling operations, providing a crucial theoretical basis for drilling engineering design and site selection, and offering technical support for the

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2025-11-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.004

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与教学工作, 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. 泥浆地面降温联合隔热钻杆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): 37-43.

GUO Wei, ZHONG Xiuping, JIA Rui, et al. Analysis of surface drilling fluid cooling combined with insulated drill pipe for wellbore temperature regulation in extra-deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 37-43.

successful implementation of extra-deep scientific drilling projects.

Key words: extra-deep scientific drilling; wellbore cooling; insulated drill pipe; surface drilling fluid cooling; wellbore drilling fluid temperature; numerical simulation

0 引言

地层超高温是超万米科学钻探面临的核心挑战。超万米特深科学钻探设计井深达 13000 m,按地温梯度 3 ℃/100 m、地面温度 20 ℃计算,井底地层温度超过 400 ℃,属于极高温高压井^[1]。而目前井下仪器的耐温极限仅 175 ℃^[2],国内水基泥浆的最高应用温度仅 240 ℃左右^[3]。因此,如何有效调控井筒泥浆温度,成为保障超万米科学钻探安全、高效施工的关键前提。

井筒降温是解决超高温地层钻探难题的核心技术^[4-11],其中泥浆地面强制冷却降温 and 喷涂隔热涂层式隔热钻杆,因不改变泥浆体系与钻柱结构,成为特深钻探井筒降温的重要技术方向。现有研究证实二者的降温效果显著:泥浆地面降温可使泥浆入井温度降低 30~40 ℃,将井底泥浆循环温度降低 7~17 ℃^[12-17];隔热钻杆导热系数低至 1.3 W/(m·K),工程数据显示,相比常规钻杆,使用隔热钻杆可将井底泥浆循环温度降低 90 ℃^[18-21]。但是,当钻探场景拓展至超万米钻井(尤其井深达 13000 m 时),上述两种技术均无法实现泥浆循环温度的有效控制。因此,探索如何将泥浆地面降温与隔热钻杆技术相结合,以突破超万米钻井的井筒泥浆温控瓶颈,已成为当前的研究热点。

尽管两种技术单独应用的效果已得到验证,但泥浆地面降温联合隔热钻杆技术对特深钻探井筒泥浆温度的分布规律及综合控温效果仍不明确。针对上述问题,本研究采用数值模拟的方法,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联合隔热钻杆对特深钻探井筒泥浆温度的影响规律和控温效果,并进一步研究了井筒降温条件下地温梯度对井筒泥浆温度的影响规律。

1 井筒泥浆温度模拟数值模型

特深钻探井筒泥浆温度模拟中数值模型的构建、几何模型的建立、钻柱热物性参数、泥浆工程参数和地层热物性参数设置,均参照课题组前期研究成果^[22]。其中,隔热钻杆的导热系数参数结合工程

实践数据确定,如表 1 所示;几何模型的建立以特深钻探井身结构为依据,如图 1 所示。

表 1 钻柱参数、泥浆和地层热物性参数表
Table 1 Parameters of drill string, and thermophysical properties of 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
四开设计井深/m	8000
五开设计井深/m	11000
六开设计井深/m	13000
地温梯度/[℃·(100 m) ⁻¹]	3.0
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]	3.5
地表温度/℃	18
泥浆动力黏度/(Pa·s)	0.03
泥浆密度/(kg·m ⁻³)	1120
泥浆导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	1.00
泥浆比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	3737
四开泥浆流量/(L·min ⁻¹)	3000
五开泥浆流量/(L·min ⁻¹)	2400
六开泥浆流量/(L·min ⁻¹)	1800
钻柱/套管导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	43.75
隔热钻杆导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	1.30 ^[19]
水泥导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	1

2 特深钻探井筒泥浆温度分布及关键温度指标

正循环钻进过程中,特深钻探井筒泥浆的温度分布和传热过程如图 2 所示。在泥浆循环过程中,环空泥浆温度始终高于钻柱中心通道内泥浆温度,平均温差可达 21.2 ℃。因此,环空泥浆是导致钻柱中心通道泥浆温度升高的主要热源。

如图 2 所示,在临界点①以上区域,环空泥浆温度高于地层温度,此时环空泥浆向地层传热,在临界点①以下,地层温度高于环空泥浆温度,地层向

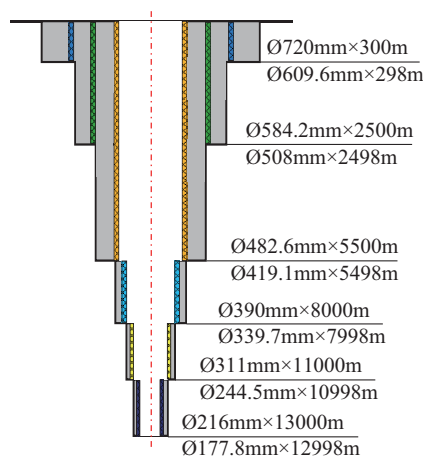


图1 特深钻探预计井身结构

Fig.1 Proposed extra-deep wellbore structure

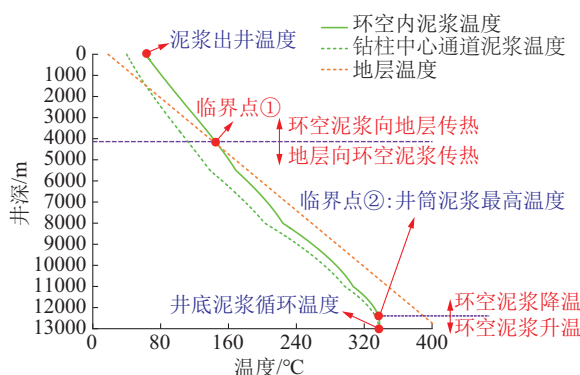


图2 井筒泥浆温度分布和关键温度指标分析

Fig.2 Distribution of wellbore drilling fluid temperature and analysis of key temperature indicators

环空泥浆传热。在临界点②以下,环空泥浆向钻柱内泥浆传热量小于地层对其传热量,环空泥浆温度升高,在临界点②以上,环空泥浆温度降低,因此,临界点②对应井筒泥浆最高温度点。

井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度是3个关键的井筒泥浆温度指标,直接决定了井下工具性能、泥浆流变性能和井控装置密封性能是否符合工作温度要求,其详细分析及安全限值见课题组前期研究成果^[22]及文献^[2-3,23]。上述3个关键温度在井筒中的分布特征如图2所示。

3 泥浆地面降温联合隔热钻杆对特深钻探井筒泥浆温度的影响

3.1 不同降温方法下井筒泥浆温度分布对比分析

3.1.1 井筒泥浆温度分布特征

在未采取井筒降温措施的情况下,钻柱中心通

道和环空内泥浆的温度分布如图3所示。在0~8000 m井段,钻柱中心通道和环空内泥浆沿井筒轴线方向的平均升温幅度相等,都为0.020 °C/m;在8000~13000 m井段,平均升温幅度分别为0.027、0.023 °C/m。泥浆升温幅度呈现出随井深增加同步增大的规律。

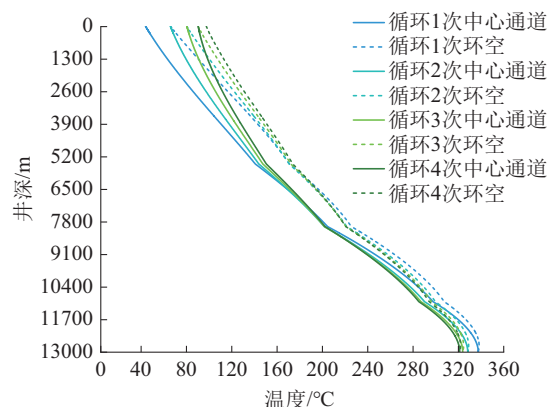


图3 不采取井筒降温钻柱中心通道和环空内泥浆温度分布

Fig.3 Temperature distribution of drilling fluid in drill string central channel and annulus without wellbore cooling

在8000~13000 m井段应用隔热钻杆的条件下,钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图4所示。在0~8000 m井段,钻柱中心通道和环空内泥浆沿井筒轴线的平均升温幅度分别为0.023、0.024 °C/m;而在8000~13000 m井段,平均升温幅度显著降至0.008、0.002 °C/m。对比未采取降温措施的场景,应用隔热钻杆后,8000~13000 m井段钻柱中心通道和环空内泥浆的升温幅度分别仅为前者的30%和9%,隔热效果显著。

在泥浆地面降温联合8000~13000 m井段应用隔热钻杆技术方案条件下,钻柱中心通道和环空内泥浆的温度分布如图5所示。在0~8000 m井段,钻柱中心通道和环空内泥浆沿井筒轴线方向的升温幅度均为0.021 °C/m;在8000~13000 m井段,升温幅度降至0.006、0.001 °C/m。与未采取降温措施的场景相比,联合技术方案下8000~13000 m井段钻柱中心通道和环空内泥浆的升温幅度仅为前者的22%和4%,充分证明该联合技术措施可有效抑制井筒泥浆温度升高。

3.1.2 井筒泥浆关键温度特征

未使用井筒降温措施时,泥浆关键温度随全孔循环次数的变化如图6所示。结果表明:井底泥浆

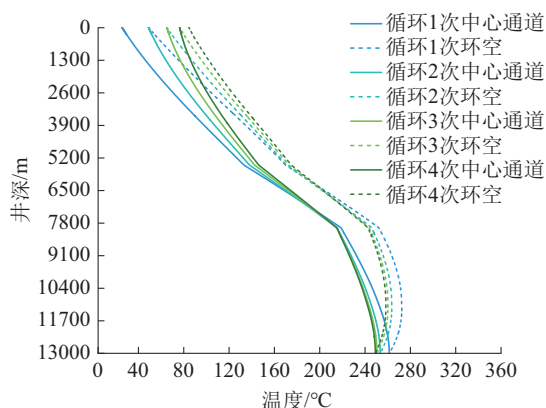


图4 8000~13000 m井段使用隔热钻杆钻柱中心通道和环空内泥浆温度分布

Fig.4 Temperature distribution of drilling fluid in the drill string central channel and annulus with insulated drill pipe applied in the 8000~13000 m section

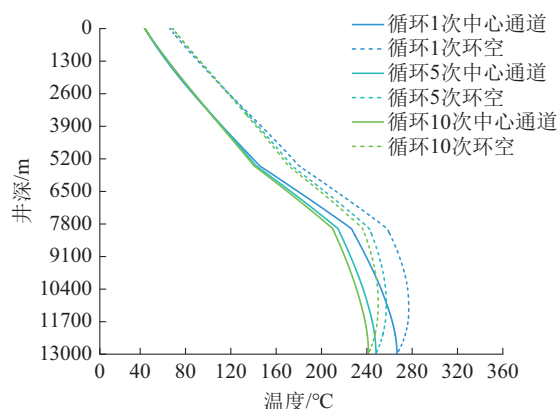


图5 泥浆地面降温联合8000~13000m井段使用隔热钻杆钻柱中心通道和环空内泥浆温度分布

Fig.5 Temperature distribution of drilling fluid in the drill string central channel and annulus with surface drilling fluid cooling combined with insulated drill pipe applied in the 8000~13000 m section

循环温度和井筒泥浆最高温度经泥浆全孔循环3次后趋于稳定,第4次全孔循环后温度分别为321、322℃;出井泥浆温度在泥浆循环过程中持续升高,在4次泥浆全孔循环时的温度值分别为62、77、87、94℃。

在8000~13000 m井段使用隔热钻杆条件下的井筒泥浆关键温度如图7所示。井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度经泥浆全孔循环3次后趋于稳定,第4次全孔循环后分别为254、263℃。对比不使用井筒降温措施,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别降低了67、59℃,降低率分别为20.9%

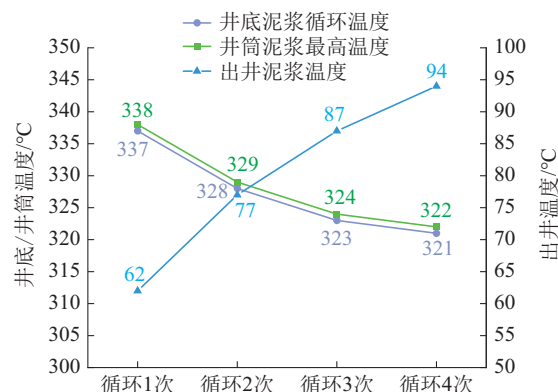


图6 不使用井筒降温条件下泥浆关键温度

Fig.6 Key temperatures of drilling fluid without wellbore cooling

和18.3%。出井泥浆温度在4次全孔循环时分别为62、78、89、95℃,与未采取降温措施时基本持平。

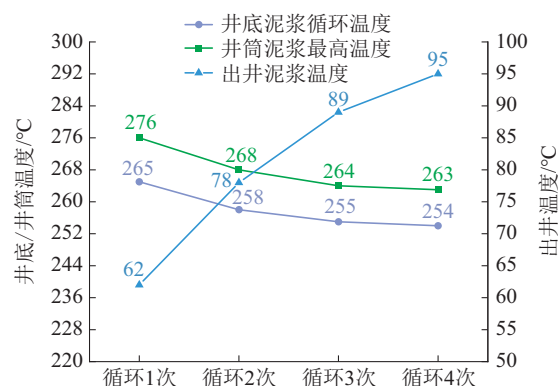


图7 8000~13000m井段使用隔热钻杆条件下井筒泥浆关键温度

Fig.7 Key temperatures of drilling fluid with insulated drill pipe applied in the 8000~13000 m section

在泥浆地面降温联合8000~13000 m井段使用隔热钻杆的技术条件下,井筒泥浆关键温度如图8所示。井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度在泥浆循环过程中持续降低,经泥浆循环10次后趋于稳定,分别为240、249℃。对比不使用井筒降温措施,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别降低了81、73℃,降低率分别为25.2%和22.7%。出井泥浆温度在循环过程中保持稳定,始终维持在65℃左右。

3.2 隔热钻杆不同应用井段条件下井筒泥浆温度分布与关键温度

鉴于特深钻探在不同开次中采用的钻具组合存在差异,为给隔热钻杆的设计与选型提供更具体

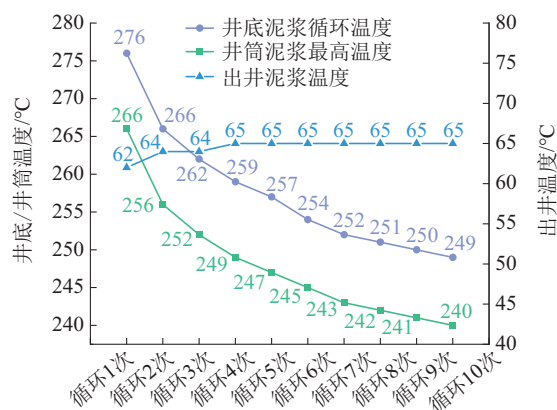


图8 泥浆地面降温联合8000~13000 m井段使用隔热钻杆条件下井筒泥浆关键温度

Fig.8 Key temperatures of drilling fluid with surface drilling fluid cooling combined with insulated drill pipe applied in the 8000~13000 m section

对性的参考,本节结合井身结构,进一步分析泥浆地面降温联合隔热钻杆技术在不同应用井段的井筒泥浆温度分布及关键温度特征。

隔热钻杆不同应用井段下环空泥浆的温度分布如图9所示。结果表明,在隔热钻杆的应用井段内,环空泥浆沿井筒轴线方向的升温幅度显著降低。这导致了井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度随隔热钻杆应用长度增长而降低。值得注意的是,由于隔热钻杆减少了环空泥浆向钻柱中心通道泥浆的热量传递,出井泥浆温度会随隔热钻杆应用长度的增加呈现小幅上升趋势,但整体仍处于安全可控范围内。

隔热钻杆不同应用井段的井筒泥浆关键温度

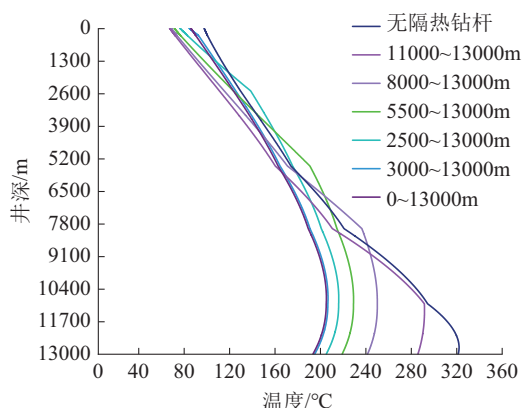


图9 隔热钻杆不同应用井段下环空泥浆温度分布
Fig.9 Temperature distribution of annular drilling fluid under different insulated drill pipe application sections

如表2所示。随着隔热钻杆应用长度的增加,井底泥浆循环温度与井筒泥浆最高温度均呈现显著下降趋势。井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度与隔热钻杆应用长度间的关系符合双参数指数模型,拟合模型计算结果与数值模拟结果的对比见图10(模型仅适用于当前研究中的井身结构和泥浆性能,普适的模型需在后续的研究中深入分析)。

表2 隔热钻杆不同应用井段下井筒泥浆关键温度
Table 2 Key temperatures of drilling fluid under different insulated drill pipe application sections

隔热钻杆应用井段/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
0~13000	191	203	82
300~13000	193	205	81
2500~13000	203	214	73
5500~13000	217	227	68
8000~13000	240	249	65
11000~13000	285	291	63
无	321	322	94

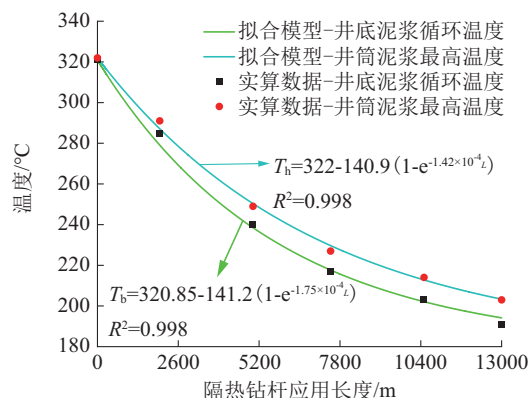


图10 井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度与隔热钻杆应用长度关系

Fig.10 Relationship between insulated drill pipe application length and both the bottom-hole circulating temperature and the maximum wellbore drilling fluid temperature

$$T_b = 320.85 - 141.2(1 - e^{-1.75 \times 10^{-4} L}) \quad (1)$$

$$T_h = 322 - 140.9(1 - e^{-1.42 \times 10^{-4} L}) \quad (2)$$

式中: T_b ——井底泥浆循环温度; L ——从井底向上应用隔热钻杆的长度; T_h ——井筒泥浆最高温度。

当隔热钻杆应用于11000~13000 m井段时,出

井泥浆温度仅63℃,低于安全温度指标,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度分别为285、291℃。目前我国正在通过实施深地国家科技重大专项研发耐300℃高温的井下工具和泥浆体系,在这样的技术条件下,采用泥浆地面降温联合隔热钻杆调控井筒温度,可支撑超万米特深钻探工程顺利完成。

4 不同地温梯度下特深钻探井筒泥浆温度分布及关键温度

采用泥浆地面降温联合11000~13000 m井段使用隔热钻杆联合方案的基础上,进一步探究了不同地温梯度对井筒泥浆温度分布及关键温度的影响,结果如图11和表3所示。地温梯度对环空泥浆温度有显著的影响,在0~11000 m井段,由地温梯度降低引起的环空泥浆温度沿井筒轴线方向的降低幅度随井深的增加而逐渐增大。在11000~13000 m井段,由于使用了隔热钻杆,环空的温度随地温梯度的降低线性降低。地温梯度每降低0.1℃/100 m,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度均可降低9℃,出井泥浆温度降低1℃。这一发现充分说明,在特深钻探工程选址阶段,优先选择低地温梯度的地层进行施工,对降低井筒泥浆温度、保障井下工具安全运行及维持泥浆性能稳定具有重要意义。

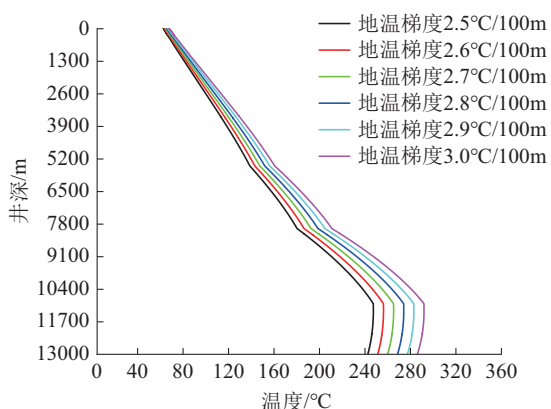


图11 不同地温梯度下环空泥浆的温度分布
Fig.11 Temperature distribution of annular drilling fluid under different geothermal gradients

5 结论

(1)泥浆地面降温联合隔热钻杆技术可有效支撑13000 m特深钻探顺利完钻,是特深钻探井筒泥浆控温的核心技术手段。通过泥浆地面降温系统

表3 不同地温梯度下的井筒泥浆关键温度

Table 3 Key temperatures of drilling fluid temperatures in the wellbore under different geothermal gradients

地温梯度/ [℃·(100 m) ⁻¹]	井底泥浆循 环温度/℃	井筒泥浆最 高温度/℃	出井泥浆温 度/℃
2.5	241	246	59
2.6	250	255	60
2.7	258	264	61
2.8	267	273	62
2.9	276	282	62
3.0	285	291	63

将泥浆入井温度控制在40℃,并在11000~13000 m井段使用隔热钻杆,可使特深钻探井底泥浆循环温度、井筒泥浆最高温度和出井泥浆温度分别稳定在285、291、63℃。

(2)增加隔热钻杆的应用长度可显著提升井筒泥浆降温效果。在2500~13000、5500~13000、8000~13000、11000~13000 m井段分别使用隔热钻杆时,井底泥浆循环温度较未采取降温措施时分别降低118、104、81、36℃,降低率分别为36.8%、32.4%、25.2%、11.2%;井筒泥浆最高温度降低108、95、73、31℃,降低率分别为33.5%、29.5%、22.7%、9.6%。

(3)地温梯度对特深钻探井筒泥浆温度有显著的影响。地温梯度每降低0.1℃/100 m,井底泥浆循环温度和井筒泥浆最高温度可同步降低9℃,出井泥浆温度降低1℃。因此,在特深钻探工程选址阶段,优先选择低地温梯度的地层进行施工,对降低井筒泥浆温度、保障井下工具安全运行及维持泥浆性能稳定具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 赵江鹏,孙友宏,郭威.钻井泥浆冷却技术发展现状与新型泥浆冷却系统的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(9):1-5.
- ZHAO Jiangpeng, SUN Youhong, GUO Wei. Current situation of drilling mud cooling technology and research on a new type of drilling mud cooling system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(9):1-5.
- [6] 刘均一,陈二丁,李光泉,等.基于相变蓄热原理的深井钻井液降温实验研究[J].石油钻探技术,2021,49(1):53-58.
- LIU Junyi, CHEN Erding, LI Guangquan, et al. Experimental study of drilling fluid cooling in deep wells based on phase change heat storage[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1):53-58.
- [7] 赵欣,李孙博,马永乐,等.一种海域天然气水合物钻井用相变控温微胶囊[J].天然气工业,2023,43(7):72-78.
- ZHAO Xin, LI Sunbo, MA Yongle, et al. Temperature-regulating phase change material microcapsule used in marine gas hydrate drilling[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(7):72-78.
- [8] 孙景涛,吕瑞典,周锡容.油田注汽井氮气隔热技术的研究与应用[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2008,10(5):19-22.
- SUN Jingtao, LV Ruidian, ZHOU Xirong. Research and application of nitrogen insulation technology of oilfield steam injection wells[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2008, 10(5):19-22.
- [9] 秦晓凯.稠油热采真空隔热油管传热特性分析[D].大庆:东北石油大学,2023.
- QIN Xiaokai. Analysis of heat transfer characteristics of the vacuum insulated tubing for heavy oil thermal recovery[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [10] Andor R, Naganawa S. Simulating effect of insulated drillpipe on downhole temperature in supercritical geothermal well drilling[C]//Proceedings 42nd New Zealand Geothermal Workshop. Waitangi: [s.n.], 2020: 1-6.
- [11] 段天奇.真空隔热钻杆设计及隔热特性研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
- DUAN Tianqi. Design of vacuum insulation drill pipe and study of insulation characteristics[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李胜忠,张铜望,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.
- [15] 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.
- [16] 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 application of circulating temperature sensitivity factors in drilling process[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(5):93-99.
- [17] 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.
- [18] McCaffrey M. Thermally insulating coating for steel drill pipe[D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2013.
- [19] Vetsak A, Besoiu C, Zatonski V, et al. The insulated drill pipe-field experience and thermal model validation[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: International Drilling Conference and Exhibition, 2024: SPE-217753-MS.
- [20] 宋先知,姚学喆,许争鸣,等.超深井控温钻井隔热涂层参数影响机制研究[J].石油钻探技术,2024,52(2):126-135.
- SONG Xianzhi, YAO Xuezhe, XU Zhengming, et al. Research on the influence mechanism of Heat-Insulating coating parameters in temperature-controlled drilling of ultra-deep well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2):126-135.
- [21] Xiao D, Hu Y F, Wang Y Y, et al. Wellbore cooling and heat energy utilization method for deep shale gas horizontal well drilling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213:118684.
- [22] 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/OL].钻探工程.(2025-11-19)[2025-11-20]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1730.TD.20251118.1738.002>
- GUO Wei, ZHONG Xiuping, JIA Rui, et al. Analysis of surface drilling fluid cooling for wellbore temperature regulation in extra-deep drilling[J/OL]. Drilling Engineering. (2025-11-19)[2025-11-20]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1730.TD.20251118.1738.002>
- [23] American Petroleum Institute (API). Specification for drill-through equipment: API specification 16A[S]. Washington: American Petroleum Institute, 2023.