



超深井控温钻井隔热涂层参数影响机制研究

宋先知 姚学 许争鸣 周蒙蒙 王庆辰

Research on the Influence Mechanism of Heat-Insulating Coating Parameters in Temperature-Controlled Drilling of Ultra-Deep Well

SONG Xianzhi, YAO Xuezhe, XU Zhengming, ZHOU Mengmeng, WANG Qingchen

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

顺北一区小井眼超深井井筒温度场特征研究与应用

Study and Application of Wellbore Temperature Field Characteristics in the Ultra-Deep Slim-Hole Wells in the Shunbei No.1 Area

石油钻探技术. 2021, 49(3): 67-74 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021006>

含寄生管和中心管的套管隔热效果影响因素研究

Research of the Influencing Factors on Thermal Insulation Effect of Casing with Parasitic Pipes and Central Tubing

石油钻探技术. 2021, 49(3): 42-47 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021048>

“三超”油气井井控技术难点及对策

Technological Challenges and Countermeasures in Well Control of Ultra-Deep, Ultra-High Temperature and Ultra-High Pressure Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2017, 45(4): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704001>

拉扭复合载荷条件下V150钻杆的力学性能研究

The Mechanical Performance of V150 Drill Pipe under Combined Tension-Torsion Loading

石油钻探技术. 2019, 47(2): 68-73 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018140>

超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析

Measurement and Analysis of Stick-Slip Characteristics of Drill String in Ultra-Deep Wells

石油钻探技术. 2017, 45(2): 32-39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702006>

保护冻土层的真空隔热套管性能试验与数值模拟研究

Performance Test and Numerical Simulation Research on Vacuum Insulated Casings for Permafrost Protection

石油钻探技术. 2021, 49(3): 21-26 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021050>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024048

引用格式: 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 Xueze, 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.

超深井控温钻井隔热涂层参数影响机制研究

宋先知^{1,3}, 姚学喆¹, 许争鸣², 周蒙蒙³, 王庆辰²

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)碳中和示范性能源学院, 北京 102249)

摘 要: 为揭示隔热涂层对超深井井筒温度场的影响规律, 针对隔热涂层与钻杆的导热特点, 采用传热热阻形式计算钻杆的综合传热系数, 构建了考虑钻杆内隔热涂层影响的超深井井筒-地层瞬态传热模型, 并采用有限差分法对模型进行离散, 利用高斯-赛德尔算法进行迭代求解。通过理论分析和现场数据验证了模型的准确性。研究发现, 钻杆内隔热涂层的导热系数对井底循环温度影响显著, 随着导热系数减小, 井筒环空温度迅速降低, 出口温度升高; 隔热涂层的厚度和长度对井筒温度也有重要影响, 隔热涂层厚度越大, 井底循环温度越低。这些发现为超深井钻井过程中井筒温度的调控和隔热钻杆参数的优选提供了重要理论依据。

关键词: 超深井; 钻井; 井筒温度; 隔热涂层; 钻杆; 综合传热系数

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0126-10

Research on the Influence Mechanism of Heat-Insulating Coating Parameters in Temperature-Controlled Drilling of Ultra-Deep Well

SONG Xianzhi^{1,3}, YAO Xueze¹, XU Zhengming², ZHOU Mengmeng³, WANG Qingchen²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 3. College of Carbon Neutral Energy, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: To reveal the influence of the heat-insulating coating on the wellbore temperature field of ultra-deep wells, the comprehensive heat transfer coefficient of the drill pipe was calculated in the form of heat transfer resistance according to the thermal conductivity characteristics of the heat-insulating coating and the drill pipe. A transient heat transfer model of the wellbore-formation of the ultra-deep well considering the heat-insulating coating inside the drill pipe was developed. The model was discretized by the finite difference method and solved iteratively by the Gauss-Seidel algorithm. The accuracy of the model was validated through theoretical analysis and field data. The results show that the thermal conductivity coefficient of the heat-insulating coating inside the drill pipe significantly affects the bottom hole circulating temperature. A decrease in conductivity coefficient leads to a rapid drop in wellbore annular temperature and an increase in exit temperature. The thickness and length of the heat-insulating coating also greatly impact wellbore temperature, with greater thickness resulting in a lower bottom hole circulating temperature. These findings offer essential theoretical support for wellbore temperature control and optimization of heat-insulating drill pipe parameters during ultra-deep well drilling.

Key words: ultra-deep wells; drilling; wellbore temperature; heat-insulating coating; drill pipe; comprehensive heat transfer coefficient

收稿日期: 2024-02-21; 改回日期: 2024-03-07。

作者简介: 宋先知(1982—), 男, 黑龙江依安人, 2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 2010年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事井筒多相流、智能钻完井与地热钻完井等方面的研究与教学工作。E-mail: songxz@cup.edu.cn。

通信作者: 许争鸣, xuzm@cugb.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 52125401)资助。

超深地层温度、压力高,导致超深井钻井过程中井筒温度高,这对钻井液、钻井工具和测量仪器等性能的影响很大。因此,需要采取相应的技术方法控制井筒温度,在保证钻井安全的同时,提高钻井效率^[1-8]。准确预测超深井井筒温度演变规律是实现井筒温度高效调控的基础。目前国内外学者主要基于稳态法和瞬态法预测和分析钻井过程中的井筒温度分布特征。稳态方法假设井筒内流体温度为稳态分布,并忽略热源项对井筒温度分布的影响;R. Spindler 和 A. R. Hasan 等人^[9-10]基于井筒与地层间热力学平衡原理,构建了井筒传热解析模型;A. Q. Al Saedi 等人^[11]考虑钻井液流动摩擦生热和钻柱旋转做功生热,建立了井筒温度场解析模型;Wu Xingru、Xu Boyue、Peng Yu 和赵金洲等人^[12-15]针对关井、生产和压裂过程中的井筒传热特点,分别提出了适用于计算关井、生产和压裂时井筒温度剖面的半解析模型。瞬态方法认为井筒流体温度随循环时间变化,Yang Mou 等人^[16]考虑径向温度梯度和轴向热传导的影响,构建了地层-井筒瞬态传热模型;Mao Liangjie 等人^[17]考虑钻头破岩生热和钻井液热物性变化的影响构建了井筒温度瞬态预测模型;李军和杨谋等人^[18-19]针对深水钻井和高温定向井特点建立了地层-井筒瞬态传热模型,并分析了溢流、漏失等对井筒温度场的影响规律。与稳态法相比,瞬态方法预测井筒温度场精度更高^[20]。由于钻井液性能受温度压力影响显著,导致井筒温度和压力也会相互影响^[21]。近年来,国内外学者建立了井筒温度-压力耦合模型来精确计算井筒温度场和压力场。Chen Xin 等人^[22]针对欠平衡钻井过程,建立了考虑循环流体热物性的井筒温度场和压力场全瞬态耦合预测模型。Xu Zhengming 和孙宝江等人^[23-25]考虑气侵、压裂和固井等情况,建立了井筒温压耦合模型,准确刻画井筒温度压力的演变规律。

井筒降温方法主要可以分为 2 种:一种是地面降温,另一种是井下降温^[26]。地面降温是采用较多的井筒降温方法,在地面将钻井液温度降低后再进入井筒循环,从而达到降低井筒温度的目的^[27-31]。该方法在现场应用中取得了较好的效果,但是需要进行大量的试验,并专门研发相应的降温设备,降温设备会占用大量地面空间,且降温幅度小,无法精确控制井筒温度。井下降温方法可分循环降温、井下节流降温和绝缘降温。循环降温的工艺相对简单,其原理是在钻井的同时控制井筒温度,每钻进一段后停钻,观察井筒温度,如果温度合适,则继续

钻进;如果温度过高,则钻井液循环一段时间,待温度合适后再继续钻进^[32-33]。该方法需要多次测量井筒温度,且深井、超深井对循环降温的限制条件较多,操作繁琐。井下节流降温,本质上是一种生产气井防止生成天然气水合物的方法,其通过建立气液两相嘴流预测模型、节流温降预测模型和气井井筒压力温度分布预测模型等,增强高含水气井临界携液能力,避免生成天然气水合物^[34-36]。该方法在中间环节上具有井筒降温作用,具体降温效果还有待研究。绝缘降温主要通过钻杆上喷涂隔热涂层并调整涂层厚度、长度、导热系数等参数,阻止热量由地层传入井筒造成井筒温度升高。国外采用该方法防止在井下生成天然气水合物^[37-41];国内则采用该方法保护随钻测控仪器^[42-44],保护随钻测控仪器在合适的温度下正常工作。

钻杆喷涂隔热涂层是一种适合井下控温的方法,在大幅度精确降温的同时,操作方法相比于其他方法更加简便,施工成本更低。考虑经济性与喷涂工艺等因素,隔热涂层覆盖钻杆的长度不宜过长,其厚度也不宜过厚。因此,应用绝缘降温技术时,需研究隔热涂层喷涂位置、喷涂长度、喷涂厚度等因素对井筒降温效果的影响。笔者建立了井筒温度场瞬态模型,依据模型分析钻杆隔热涂层参数对井筒温度的影响,定性得出井筒温度与钻杆隔热涂层的关系,以期对万米超深井钻井井筒温度场控制起到指导作用。

1 超深井井筒温度场瞬态模型的建立

超深井井筒温度场控制单元主要包括钻杆内钻井液、钻杆、环空内钻井液、套管、水泥环和地层,基于钻井液循环过程以及井筒与地层间的传热特点,作如下假设:

- 1) 忽略钻井液循环过程中热传导传递的热量,仅考虑其轴向上钻井液流动携带的热量以及径向上与钻杆/井壁之间的对流换热;
- 2) 对于钻杆,忽略其径向上热传导产生的热量交换,只考虑其在轴向上与钻柱内和环空内钻井液的对流换热;
- 3) 钻井液为单相不可压缩流体,忽略温度、压力对其热物性和流变性的影响;
- 4) 地层具有均质性,其热物性始终保持不变;
- 5) 井眼和井壁形状规则,钻柱居中,全井段不存在钻柱屈曲和偏心现象;

6)距离井筒径向一定距离地层的温度始终为地层原始温度。

基于以上假设,采用热力学第一定律分别建立了钻杆内钻井液、环空内钻井液、套管、水泥环和地层的温度场控制方程。

1.1 基本公式

物体内能变化为:

$$Q = \rho c V \Delta \theta \quad (1)$$

式中: Q 为热量, J; ρ 为物体密度, kg/m^3 ; c 为物体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; V 为物体体积, m^3 ; $\Delta \theta$ 为温度变化量, $^\circ\text{C}$ 。

计算对流换热的牛顿冷却公式为:

$$Q = h A \Delta \theta \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A 为换热表面积, m^2 。

计算热传导的傅里叶定律公式为:

$$Q = -\lambda A \frac{\Delta \theta}{\delta} \quad (3)$$

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; δ 为导热距离, m 。

热力学第一定律为:

$$dU = dQ + dW \quad (4)$$

式中: dU 为热力学能改变量, J; dQ 为传热量, J; dW 为外界做功, J。

1.2 地层-井筒传热控制方程

使用微元法,将井筒分为多个微元体。基于以上传热学基本公式,针对钻杆内钻井液、环空内钻井液、套管、水泥环和地层,分析其微元体的传热情况,建立微元体的传热控制方程。为降低模型的复杂度,提高计算效率,笔者采用综合传热系数描述钻杆内钻井液与钻杆壁或隔热涂层间的对流换热、隔热涂层与钻杆壁的导热以及环空内钻井液与钻杆壁间对流换热的复杂传热过程。

1)钻杆内钻井液传热模型。对于钻杆内部钻井液,其存在钻井液向下流动携带热量以及钻井液通过钻杆与环空钻井液间的换热。这2部分传热组成了钻杆内钻井液微元体内能的变化,其传热控制方程为:

$$\rho_d c_{p,d} \pi r_{p,i}^2 \frac{\partial \theta_d}{\partial t} = -\rho_d v_d \pi r_{p,i}^2 c_{p,d} \frac{\partial \theta_d}{\partial z} + 2\pi r_{p,i} K (\theta_{an} - \theta_d) \quad (5)$$

式中: ρ_d 为钻井液密度, kg/m^3 ; $c_{p,d}$ 为钻杆内钻井液的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $r_{p,i}$ 为钻杆内半径, m ; θ_d 为钻杆内钻井液温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s ; v_d 为钻杆内钻井液流速, m/s ; K 为钻杆的综合传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

θ_{an} 为环空内钻井液的温度, $^\circ\text{C}$ 。

2)环空内钻井液传热模型。对于环空内钻井液,其存在钻井液向上流动携带热量、通过钻杆壁与钻杆内钻井液换热以及与套管的对流换热。这3部分传热组成了环空内钻井液微元体内能的变化,其传热控制方程为:

$$\rho_{an} c_{p,an} \pi (r_{ca1,i}^2 - r_{p,o}^2) \frac{\partial \theta_{an}}{\partial t} = \rho_{an} v_{an} \pi (r_{ca1,i}^2 - r_{p,o}^2) c_{p,an} \cdot \frac{\partial \theta_{an}}{\partial z} + 2\pi r_{p,o} K (\theta_d - \theta_{an}) + 2\pi r_{ca1,i} h_{an-ca1} (\theta_{ca1} - \theta_{an}) \quad (6)$$

式中: ρ_{an} 为环空内钻井液密度, kg/m^3 ; $c_{p,an}$ 为环空内钻井液的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $r_{ca1,i}$ 为由内向外第一层套管内半径或井眼半径, m ; $r_{p,o}$ 为钻杆外半径, m ; v_{an} 为钻杆内钻井液流速, m/s ; h_{an-ca1} 为环空内钻井液与套管或井壁的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; θ_{ca1} 为由内向外第一层套管或井眼的温度, $^\circ\text{C}$ 。

3)套管传热模型。对于套管,其存在轴向热传导、与环空内钻井液对流换热以及与水泥环及后方地层的热传导。这3部分传热组成了套管微元体内能的变化,其传热控制方程为:

$$\rho_{ca1} c_{p,ca1} \pi (r_{ca1,o}^2 - r_{ca1,i}^2) \frac{\partial \theta_{ca1}}{\partial t} = \lambda_{ca1} \pi (r_{ca1,o}^2 - r_{ca1,i}^2) \cdot \frac{\partial^2 \theta_{ca1}}{\partial z^2} + 2\pi r_{ca1,i} h_{an-ca1} (\theta_{an} - \theta_{ca1}) + 2\pi r_{ca1,o} \frac{2\lambda_{ca1-ce1}}{r_{ca2,i} - r_{ca1,i}} (\theta_{ce1} - \theta_{ca1}) \quad (7)$$

式中: ρ_{ca1} 为套管的密度, kg/m^3 ; $c_{p,ca1}$ 为套管的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $r_{ca1,o}$ 为由内向外第一层套管的外半径, m ; λ_{ca1} 为套管的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; $r_{ca2,i}$ 为由内向外第二层套管内半径, m ; $\lambda_{ca1-ce1}$ 为套管与水泥环的综合导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_{ce1} 为由内向外第一层水泥环的温度, $^\circ\text{C}$ 。

4)水泥环及外侧地层传热模型。对于水泥环及外侧地层,采用柱坐标建模,其存在径向和轴向热传导。这2部分传热组成了水泥环及外侧地层微元体内能的变化,其传热控制方程为:

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_f}{\partial r} \right) + \lambda_f \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial z^2} \quad (8)$$

式中: ρ_f 为水泥环或地层的密度, kg/m^3 ; $c_{p,f}$ 为水泥环或地层的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_f 为水泥环或地层温度, $^\circ\text{C}$; r 为微元体距离井筒中心轴线的距离, m 。

1.3 综合传热系数

对于钻杆壁部分,隔热涂层的导热系数远小于

钻杆的导热系数, 采用传热热阻形式计算钻杆的综合传热系数, 如图 1 所示。

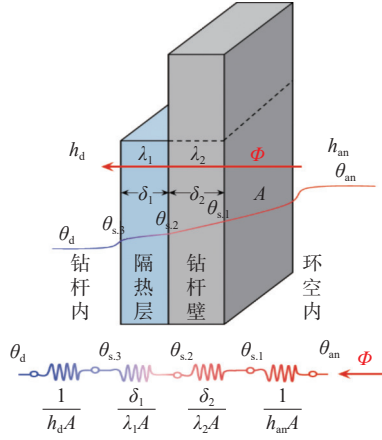


图 1 钻井液与隔热钻杆传热示意

Fig.1 Heat transfer between drilling fluid and heat-insulating drill pipe

钻井液与隔热钻杆的传热过程包含 4 个环节: 1) 环空钻井液到钻杆外壁面的热量传递; 2) 钻杆外壁面到钻杆内壁面(隔热涂层外壁面)的热量传递; 3) 隔热层外壁面到隔热涂层内壁面的热量传递; 4) 隔热涂层内壁面到钻杆内钻井液的热量传递。串联的每个环节的热流量 Φ 是相同的^[45]。 Φ 分别表示为:

$$\Phi = Ah_{an}(\theta_{an} - \theta_{s,1}) \quad (9)$$

$$\Phi = \frac{A\lambda_2}{\delta_2}(\theta_{s,1} - \theta_{s,2}) \quad (10)$$

$$\Phi = \frac{A\lambda_1}{\delta_1}(\theta_{s,2} - \theta_{s,3}) \quad (11)$$

$$\Phi = Ah_d(\theta_{s,3} - \theta_d) \quad (12)$$

式中: Φ 为热流量, W; h_{an} 为环空内钻井液与钻杆外壁的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $\theta_{s,1}$ 为钻杆外壁面的温度, $^\circ C$; λ_2 为钻杆的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; δ_2 为钻杆的壁厚, m; $\theta_{s,2}$ 为钻杆内壁面(隔热涂层外壁面)的温度, $^\circ C$; λ_1 为隔热涂层的导热系数, $W/m \cdot ^\circ C$; δ_1 为隔热涂层的厚度, m; $\theta_{s,3}$ 为隔热涂层内壁面的温度, $^\circ C$; h_d 为钻杆内钻井液与隔热涂层内壁面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

将式(9)—式(12)改写为温压形式, 并消去壁面温度 $\theta_{s,1}$, $\theta_{s,2}$ 和 $\theta_{s,3}$, 可得:

$$\Phi = \frac{A(\theta_{an} - \theta_d)}{\frac{1}{h_{an}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_d}} = AK(\theta_{an} - \theta_d) \quad (13)$$

$$\left(\frac{\rho_d c_{p,d} \pi r_{p,i}^2}{\Delta t} + \frac{\rho_d v_d \pi r_{p,i}^2 c_{p,d}}{\Delta z} + 2\pi r_{p,i} K \right) \theta_{d,j}^{n+1} - \frac{\rho_d v_d \pi r_{p,i}^2 c_{p,d}}{\Delta z} \theta_{d,j-1}^n - 2\pi r_{p,i} K \theta_{an,j}^n = \frac{\rho_d c_{p,d} \pi r_{p,i}^2}{\Delta t} \theta_{d,j}^{n-1} \quad (18)$$

则综合传热系数 K 可表示为:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{an}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_d}} \quad (14)$$

1.4 初始条件与边界条件

1) 初始条件。假设钻井液开始循环前, 井筒已静置一段时间, 井筒温度与地层原始温度相等, 以此作为模型的初始条件。

$$\begin{cases} \theta_d(z, t=0) = \theta_f(z) = \theta_s + G_f z \\ \theta_p(z, t=0) = \theta_f(z) = \theta_s + G_f z \\ \theta_{an}(z, t=0) = \theta_f(z) = \theta_s + G_f z \\ \theta_{ca}(z, t=0) = \theta_f(z) = \theta_s + G_f z \\ \dots\dots \\ \theta_f(z, t=0) = \theta_f(z) = \theta_s + G_f z \end{cases} \quad (15)$$

式中: θ_s 为地表的温度, $^\circ C$; G_f 为地层的温度梯度, $^\circ C/m$ 。

2) 边界条件。开始循环后, 井口实时测量的入口温度保持不变, 则井口边界条件为:

$$\theta_d(z=0, t) = \theta_{in} \quad (16)$$

式中: θ_{in} 为钻柱内钻井液的入口温度, $^\circ C$ 。

在井底处, 钻柱内钻井液与环空内钻井液的温度相等, 则井底边界条件可表示为:

$$\theta_d(z=Z_b, t) = \theta_{an}(z=Z_b, t) \quad (17)$$

式中: Z_b 为井底的深度, m。

径向上与井筒一定距离处地层的温度始终为地层原始温度。

2 模型求解及验证

2.1 模型求解

基于有限差分法分别对钻杆内钻井液传热控制方程、环空内钻井液传热控制方程、套管传热控制方程和水泥环及后续地层传热控制方程进行离散。其中, 一阶偏导项采用向后差分格式, 二阶偏导项采用中心差分格式。

钻杆内钻井液传热控制方程的离散形式为:

态解析模型, 未考虑钻杆壁厚及井筒温度对周边地层的影响。为了能够对比这 2 个模型, 需要调整本文模型, 使循环时间足够大以达到稳态温度场, 并忽略隔热涂层、钻杆壁厚和地层的影响。将以下参数输入 Holmes & Swift 模型和本文所建模型, 井深 4 572 m, 井眼直径 212.7 mm; 地层比热容 873.36 J/(kg·℃), 地层密度 2 644.2 kg/m³, 地温梯度 2.31 ℃/100m, 地层导热系数 2.249 W/(m·℃); 地表温度 15.278 ℃; 钻

柱外径 168.3 mm, 钻柱内径 151.5 mm, 钻柱材料密度 7 800 kg/m³, 钻柱壁导热系数 43.75 W/(m·℃), 钻柱壁比热容 400 J/(kg·℃); 钻井液密度 1 198.3 kg/m³, 钻井液比热容 1 674.7 J/(kg·℃), 钻井液入口温度 23.889 ℃; 循环排量 0.013 2 m³/s; 钻井液与钻柱壁对流换热系数 340.695 8 W/(m²·℃), 钻井液与套管对流换热系数 5.678 3 W/(m²·℃), 计算得到钻柱内和环空内钻井液温度分布(见图 2)。

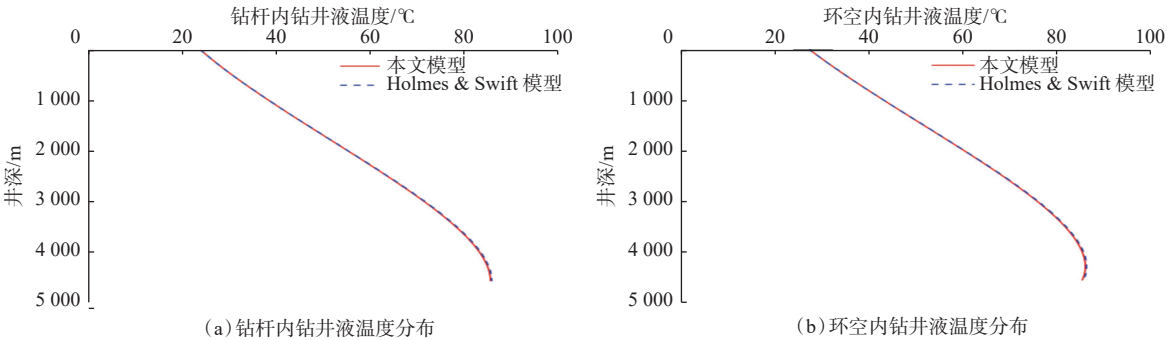


图 2 Holmes & Swift 模型与本文模型计算结果对比结果

Fig.2 Comparison results between Holmes & Swift model and the proposed model

由图 2 可知, 本文模型计算出的钻柱内和环空内钻井液的温度分布曲线与 Holmes & Swift 模型计算出的温度分布曲线总体吻合程度高, 验证了本文所建模型的正确性。

2.3 实例验证

为了进一步验证本文所建立井筒-地层瞬态传热模型在超深定向井实际井身结构条件下的精度和可靠性, 利用塔里木盆地 1 口超深定向井及其井底

实测循环温度对模型进行了验证。
X 井为塔里木盆地的一口超深探井, 主要钻探目的是探索奥陶系中统及中—下统储层发育情况与含油气性。该井完钻井深 8 543 m, 垂深 8 296 m, 补心高 13.70 m, 钻进 8 425~8 516 m 井段时, 主要钻遇灰岩地层, 正常循环钻进 22 h 后, 随钻测量仪器测得井底循环温度为 160 ℃。该井的实际井身结构和井眼扩大率情况见表 1。

表 1 X 井的井身结构与井眼扩大率

Table 1 Casing program and borehole expansion rate of Well X

开次	钻头直径/mm	井深/m	套管外径/mm	套管下深/m	水泥返深/m	井眼扩大率, %
导管	660.4	105.00	508.0	105.00	0	
一开	444.5	1 199.50	339.7	1 199.15	0	
二开	311.1	4 363.00	250.8	4 362.00	0	3.94
三开	215.9	7 728.00	177.8	7 726.77	4 162	4.14
四开	149.2	8 543.00				3.43

该井段钻进所采用的钻具组合为 φ149.2 mm 钻头+φ120.0 mm 螺杆+φ127.0 mm 浮阀+φ120.6 mm 无磁钻铤+φ121.0 mm 无磁悬挂短节+φ88.9 mm 钻杆+φ88.9 mm 加重钻杆+φ88.9 mm 钻杆+φ127.0 mm 钻杆+φ139.7 mm 短钻杆。钻井液、钻柱、套管、水泥环和地层等传热介质的热物性参数见表 2。

8 425~8 516 m 井段时采用聚磺钻井液钻进, 黏度 22 mPa·s, 排量 15 L/s, 钻井液入口温度 34 ℃, 出口温度 35 ℃, 考虑实际井身结构、钻具组合和平均井径扩大率的影响, 以完钻静置一段时间后的电测温度为地层原始温度, 构建 X 井井筒循环温度场预测模型, 预测该井井筒循环温度场, 结果如图 3 所示。

表 2 X 井的传热介质热物性参数

Table 2 Thermal property parameters of heat transfer medium of Well X

介质	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
钻井液	1 600	1 600	1.200
钻柱	7 800	500	48.000
套管	7 800	500	48.000
水泥环	2 140	2 000	0.700
地层岩石	2 655	985	2.021

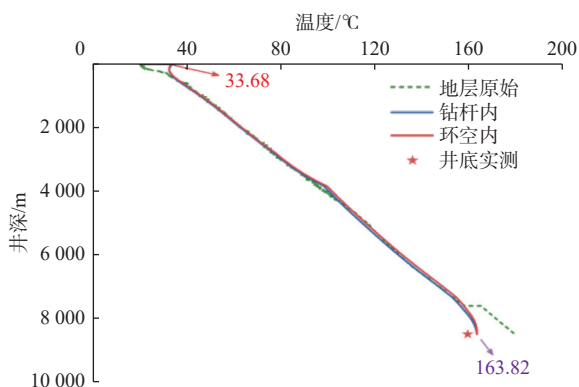


图 3 X 井井筒循环温度场的预测结果

Fig.3 Prediction results of wellbore circulation temperature field of Well X

由图 3 可知:模型预测 X 井井底循环温度为 163.82 $^{\circ}\text{C}$,出口温度为 33.68 $^{\circ}\text{C}$;与实测结果相比,预测井底循环温度的绝对误差为-3.82 $^{\circ}\text{C}$,相对误差为 2.39%,预测出口温度的绝对误差为 1.32 $^{\circ}\text{C}$,相对误差为 3.77%;预测结果与实测结果较为吻合,二者相对误差在 5% 以内,满足工程上相对误差不大于 10% 的要求,进一步验证了上文所建立井筒-地层瞬态温度场预测模型的有效性和可靠性。

3 钻杆内隔热涂层对井筒温度场的影响

采用 1 口井深为 8 000 m 的模拟直井,分析钻杆内隔热涂层导热系数、厚度和长度对井筒温度场的影响规律。模拟井的参数:井深 8 000 m;井眼直径 0.213 m;地层比热容 837 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,地层密度 2 645 kg/m^3 ,地温梯度 0.023 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$,地表温度 15.3 $^{\circ}\text{C}$,地层导热系数 2.25 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$;钻柱外径 0.168 m,钻柱内径 0.151 m,钻柱材料密度 7 800 kg/m^3 ,钻柱导热系数 43.75 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,钻柱比热容 400 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$;钻井液密度 1 200 kg/m^3 ,钻井液黏度 45.4 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,钻

井液比热容 1 675 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,钻井液入口温度 24.0 $^{\circ}\text{C}$,钻井液导热系数 1.73 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$;循环排量 13.2 L/s 。

3.1 隔热涂层导热系数

钻井参数与钻井液性能保持不变,钻井液循环时间为 100 h,钻杆内隔热涂层的厚度为 2.0 mm,8 000 m 钻柱均喷涂内隔热涂层,模拟计算喷涂不同导热系数隔热涂层下的井筒环空温度剖面,结果如图 4 所示。

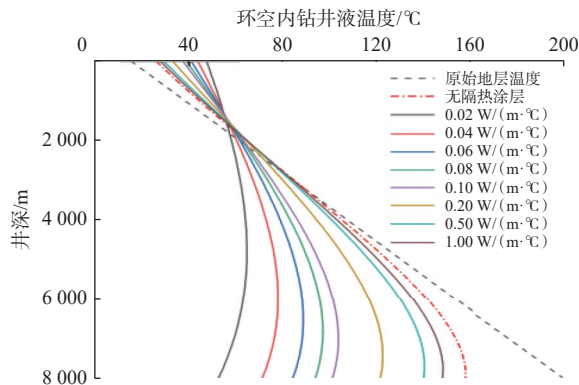


图 4 不同导热系数隔热涂层下的环空内温度剖面

Fig.4 Wellbore annular temperature profile under different thermal conductivities of heat-insulating coating

由图 4 可知:随着钻杆内隔热涂层导热系数增大,井筒环空温度逐渐升高,且导热系数越大,对井筒环空温度的影响越小;此外,环空温度最高点的位置逐渐变深,而出口温度则随着钻杆内隔热涂层导热系数增大而降低。在相同钻井参数和循环时间条件下,钻杆内隔热涂层的导热系数越小,钻杆对其内钻井液的保温效果越好,则井底处的钻井液温度越低;钻井液上返过程中,由于在井底流入环空时的温度较低,所以在吸收相同热量条件下,采用隔热钻杆时的环空钻井液温度低于无隔热钻杆;在井口附近,由于隔热钻杆的保温作用,钻杆内钻井液从环空钻井液中吸收的热量减少,热交换作用减弱,且钻杆隔热涂层的导热系数越小,环空出口温度越高。当全部钻柱喷涂厚度为 2.0 mm、导热系数为 0.02 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 的隔热涂层时,相比于地层静态温度,井底循环温度降低了 148 $^{\circ}\text{C}$,降低率高达 74%;相比于无隔热涂层,井底循环温度降低了 105 $^{\circ}\text{C}$,降低率为 67%。

3.2 隔热涂层厚度

钻井参数和钻井液性能保持不变,钻井液循环时间为 100 h,钻杆内隔热涂层的导热系数为 0.06 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,8 000 m 钻柱内均喷涂隔热涂层,模拟计算钻柱喷涂不同厚度隔热涂层时的井筒环空温度

剖面, 结果如图 5 所示。

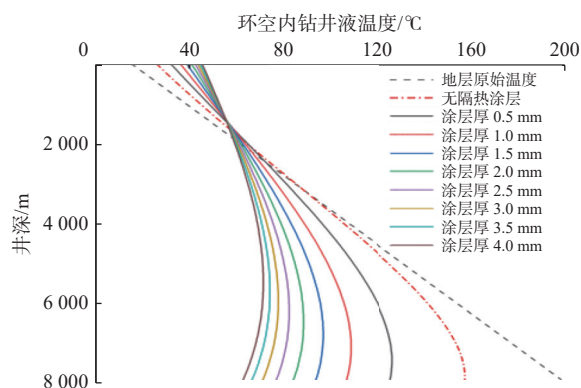


图 5 不同厚度隔热涂层下的环空内温度剖面

Fig.5 Annular temperature profile under different thicknesses of heat-insulating coating

由图 5 可知: 随着钻杆内隔热涂层厚度增大, 井筒环空温度逐渐降低, 且厚度增加到一定程度后, 对井筒环空温度的影响程度降低; 此外, 出口温度随着钻杆内隔热涂层厚度增大而升高, 而环空温度最高点的位置则随着隔热涂层厚度增大而不断变浅。在相同钻井参数、循环时间及隔热涂层参数条件下, 钻杆内隔热涂层的厚度越大, 钻杆的综合传热系数越小, 隔热钻杆对钻杆内钻井液的保温效果越好, 井底处的钻井液温度越低; 在钻井液上返过程中, 由于井底钻井液流入环空时的温度较低, 所以在吸收相同热量的条件下, 钻杆内隔热涂层厚度大时环空钻井液的温度低于无隔热钻杆; 在井口附近, 由于隔热钻杆的保温作用, 隔热涂层厚度越大, 钻杆内钻井液从环空钻井液中吸收的热量越少, 热交换作用越弱, 致使出口温度随着隔热涂层厚度增厚而升高。井下钻柱内喷涂厚度为 4.0 mm、导热系数为 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的隔热涂层时, 相比于地层静态温度, 井底循环温度降低了 138°C , 降低率达 69%; 相比于钻杆内无隔热涂层, 井底循环温度降低了 95°C , 降低率达 60%。

3.3 隔热涂层长度

钻井参数与钻井液性能保持不变, 钻杆内隔热涂层的导热系数为 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、隔热涂层喷涂厚度为 2.0 mm, 钻井液循环时间为 100 h, 模拟计算钻柱内喷涂不同长度隔热涂层时的井筒环空温度剖面, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 随着钻杆内隔热涂层长度增加, 井筒环空温度逐渐降低, 隔热涂层越长, 井底循环温度越低; 此外, 环空温度最高点的位置则随着隔热涂层长度增大而不断变浅, 而出口温度则随着隔

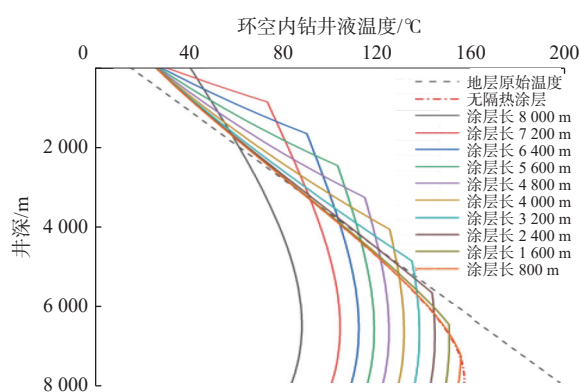


图 6 不同长度隔热涂层下的环空内温度剖面

Fig.6 Annular temperature profile under different lengths of heat-insulating coating

热涂层长度增加而升高, 当井口钻杆有隔热涂层时, 出口温度升高最显著。在相同钻井参数、循环时间、钻杆内隔热涂层厚度和导热系数条件下, 隔热涂层长度越大, 钻杆对其内钻井液的保温效果越好, 井底循环温度越低; 钻井液上返过程中, 由于流入环空钻井液的温度低, 所以在吸收相同热量的条件下, 隔热涂层长度大的环空钻井液温度低于无隔热钻杆。在井口附近, 当井口钻杆没有隔热涂层时, 热交换作用显著, 钻杆内钻井液的温度迅速升高; 当井口钻杆具有隔热涂层时, 由于隔热涂层的保温作用, 钻杆内钻井液从环空钻井液中吸收的热量少, 热交换作用弱, 致使钻杆内温度升高幅度很小。当井内全部管柱喷涂厚度 2.0 mm、导热系数 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的隔热涂层时, 相比于地层静态温度, 井底循环温度降低了 116°C , 降低率高达 58%, 相比于无隔热涂层的井筒循环温度, 井底循环温度降低了 74°C , 降低率 47%; 而当仅井底 800 m 喷涂厚度 2.0 mm、导热系数 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的隔热涂层时, 相比于地层静态温度, 井底循环温度仅降低了 45°C , 降低率 23%, 相比于无隔热涂层的井底循环温度, 降低了 3°C 左右, 降低率不到 2%。

4 结 论

1) 针对超深井钻井开泵循环钻井液的过程, 基于能量守恒原理, 构建了考虑钻杆内喷涂隔热涂层时的超深井井筒-地层瞬态传热模型; 与 Holmes & Swift 模型和超深井钻井现场实际数据进行了对比, 验证了模型的可靠性和准确性。

2) 钻杆内隔热涂层的导热系数对井底循环温度影响显著, 随着钻杆内隔热涂层导热系数减小,

井筒环空温度迅速降低,出口温度升高,环空最高温度点的位置上移。

3) 钻杆内隔热涂层的厚度和长度对井筒温度有重要影响,井筒环空温度随着钻杆内隔热涂层厚度增大而降低,出口温度升高,环空最高温度点的位置上移。

4) 建立的考虑隔热钻杆的超深井井筒-地层瞬态传热模型进一步拓展了传统的井筒传热模型,为超深井、特深井钻井过程中井筒温度的调控与隔热钻杆参数的优选提供了理论基础。

参考文献

References

- [1] 匡立春,支东明,王小军,等.新疆地区含油气盆地深层—超深层成藏组合与勘探方向[J].中国石油勘探,2021,26(4):1-16.
KUANG Lichun, ZHI Dongming, WANG Xiaojun, et al. Oil and gas accumulation assemblages in deep to ultra-deep formations and exploration targets of petroliferous basins in Xinjiang Region[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 1-16.
- [2] 王志刚,王稳石,张立烨,等.万米科学超深井钻完井现状与展望[J].科技导报,2022,40(13):27-35.
WANG Zhigang, WANG Wenshi, ZHANG Liye, et al. Present situation and prospect of drilling and completion of 10 000 meter scientific ultra deep wells[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(13): 27-35.
- [3] 李涛,苏强,杨哲,等.川西地区超深井钻完井技术现状及攻关方向[J].石油钻探技术,2023,51(2):7-15.
LI Tao, SU Qiang, YANG Zhe, et al. Current practices and research directions for drilling and completion technologies for ultra-deep wells in Western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 7-15.
- [4] 汪海阁,黄洪春,纪国栋,等.中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进步与挑战[J].中国石油勘探,2023,28(3):1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.
- [5] 苏义脑,路保平,刘岩生,等.中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J].石油钻采工艺,2020,42(5):527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.
- [6] 邓虎,贾利春.四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J].天然气工业,2022,42(12):82-94.
DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: current status, challenges and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 82-94.
- [7] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等.深井超深井油气钻井技术进步与展望[J].天然气工业,2021,41(8):163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [8] KHALED M S, WANG Ningyu, ASHOK P, et al. Strategies for prevention of downhole tool failure caused by high bottomhole temperature in geothermal and high-pressure/high-temperature oil and gas wells[J]. SPE Drilling & Completion, 2023, 38(2): 243-260.
- [9] SPINDLER R. Analytical models for wellbore-temperature distribution[J]. SPE Journal, 2011, 16(1): 125-133.
- [10] HASAN A R, KABIR C S. Wellbore heat-transfer modeling and applications[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86/87: 127-136.
- [11] AL SAEDI A Q, FLORI R E, KABIR C S. Influence of frictional or rotational kinetic energy on wellbore-fluid/temperature profiles during drilling operations[J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 34(2): 128-142.
- [12] WU Xingru, XU Boyue, LING Kegang. A semi-analytical solution to the transient temperature behavior along the vertical wellbore after well shut-in[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 131: 122-130.
- [13] XU Boyue, WU Xingru, GAO Yonghui, et al. A semi-analytical solution to the transient temperature behavior along the wellbore and its applications in production management[R]. SPE 170631, 2014.
- [14] PENG Yu, ZHAO Jinzhou, SEPEHRNOORI K, et al. Study of the heat transfer in the wellbore during acid/hydraulic fracturing using a semianalytical transient model[J]. SPE Journal, 2019, 24(2): 877-890.
- [15] 赵金洲,彭瑀,李勇明,等.基于双层非稳态导热过程的井筒温度场半解析模型[J].天然气工业,2016,36(1):68-75.
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LI Yongming, et al. A semi-analytic model of wellbore temperature field based on double-layer unsteady heat conducting process[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 68-75.
- [16] YANG Mou, TANG Daqian, CHEN Yuanhang, et al. Determining initial formation temperature considering radial temperature gradient and axial thermal conduction of the wellbore fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 876-885.
- [17] MAO Liangjie, WEI Changjiang, JIA Hai, et al. Prediction model of drilling wellbore temperature considering bit heat generation and variation of mud thermophysical parameters[J]. Energy, 2023, 284: 129341.
- [18] 张锐尧,李军,柳贡慧,等.深水钻井多压力系统条件下的井筒温度场研究[J].石油机械,2021,49(7):77-85.
ZHANG Ruiyao, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Research on the wellbore temperature field under the multiple pressure system during deep water drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 77-85.
- [19] LI Gao, YANG Mou, MENG Yingfeng, et al. Transient heat transfer models of wellbore and formation systems during the drilling process under well kick conditions in the bottom-hole[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 339-347.
- [20] 赵向阳,赵聪,王鹏,等.超深井井筒温度数值模型与解析模型计算精度对比研究[J].石油钻探技术,2022,50(4):69-75.
ZHAO Xiangyang, ZHAO Cong, WANG Peng, et al. A comparative study on the calculation accuracy of numerical and analytical models for wellbore temperature in ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 69-75.
- [21] 田得强,李中,许亮斌,等.深水高温高压气井钻井循环温度压力耦合计算与分析[J].中国海上油气,2022,34(5):149-157.
TIAN Deqiang, LI Zhong, XU Liangbin, et al. Coupling calculation and analysis of circulating temperature pressure distribution in deep-water HTHP gas well drilling[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022,

- 34(5): 149–157.
- [22] CHEN Xin, HE Miao, XU Mingbiao, et al. Fully transient coupled prediction model of wellbore temperature and pressure for multi-phase flow during underbalanced drilling[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 223: 211540.
- [23] XU Zhengming, CHEN Xuejiao, SONG Xianzhi, et al. Gas-kick simulation in oil-based drilling fluids with nonequilibrium gas-dissolution and -evolution effects[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(5): 2549–2569.
- [24] XU Zhengming, WU Kan, SONG Xianzhi, et al. A unified model to predict flowing pressure and temperature distributions in horizontal wellbores for different energized fracturing fluids[J]. *SPE Journal*, 2019, 24(2): 834–856.
- [25] 王雪瑞, 孙宝江, 王志远, 等. 考虑温度压力耦合效应的控压固井全过程水力参数计算方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 103–112.
- WANG Xuerui, SUN Baojiang, WANG Zhiyuan, et al. Calculation method of hydraulic parameters in whole cementing process considering coupling effect of temperature and pressure[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(2): 103–112.
- [26] 王金磊, 江波, 黄范勇. 井筒降温技术研究综述[J]. 新疆石油科技, 2015, 25(2): 9–11.
- WANG Jinlei, JIANG Bo, HUANG Fanyong. A review of wellbore cooling technology[J]. *Xinjiang Petroleum Science & Technology*, 2015, 25(2): 9–11.
- [27] 吴鹏程, 钟成旭, 严俊涛, 等. 深层页岩气水平井钻进中井筒-地层瞬态传热模型[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(1): 1–8.
- WU Pengcheng, ZHONG Chengxu, YAN Juntao, et al. Well-formation transient heat transfer model during drilling of deep shale gas horizontal wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(1): 1–8.
- [28] 梁晓阳, 赵聪, 赵向阳, 等. 基于热管技术的钻井液地面降温系统研制[J]. 石油机械, 2023, 51(3): 24–32.
- LIANG Xiaoyang, ZHAO Cong, ZHAO Xiangyang, et al. Development of the drilling fluid surface cooling system based on heat pipes[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(3): 24–32.
- [29] 李涛, 杨哲, 徐卫强, 等. 泸州区块深层页岩气水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 16–21.
- LI Tao, YANG Zhe, XU Weiqiang, et al. Optimized and fast drilling technology for deep shale gas horizontal wells in Luzhou Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 16–21.
- [30] 贾利春, 李枝林, 张继川, 等. 川南海相深层页岩气水平井钻井关键技术与实践[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 145–152.
- JIA Lichun, LI Zhilin, ZHANG Jichuan, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(2): 145–152.
- [31] 王建龙, 于志强, 苑卓, 等. 四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 17–22.
- WANG Jianlong, YU Zhiqiang, YUAN Zhuo, et al. Key technologies for deep shale gas horizontal well drilling in Luzhou Block of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(6): 17–22.
- [32] 刘昌弟, 孙元伟, 程怀标. 南海琼东南盆地高温低压大位移井钻井技术[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 80–83.
- LIU Changdi, SUN Yuanwei, CHENG Huaibiao. High temperature, low pressure and extended reach well drilling in the southeast Hainan Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(6): 80–83.
- [33] 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.
- [34] 肖雨阳. 高含水气井井下节流工艺参数优化[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- XIAO Yuyang. Optimization of downhole throttling process parameters for gas wells with high water content[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [35] 闫新. 高含水气井井下节流特性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- YAN Xin. Study on downhole throttling characteristics of high water-cut gas wells[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [36] 余朝毅. 井下节流机理研究及现场应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2004.
- YU Zhaoyi. Research on downhole throttling mechanism and field application[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.
- [37] SOPRANI S, ENGELBRECHT K, NØRGAARD A J. Active cooling and thermal management of a downhole tool electronics section[C]//Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration. Paris: International Institute of Refrigeration, 2015: 85.
- [38] CHIN Y D, KVAERNER A. Cool-down-temperature overshoot phenomenon in subsea flowline and riser systems[R]. OTC 15253, 2003.
- [39] BONNISSEL M, OZOUX V, COUPRIE S, et al. Gel based materials for high insulation and long cool down time in deep water[R]. OTC 16504, 2004.
- [40] JANOFF D, MCKIE N, DAVALATH J. Prediction of cool down times and designing of insulation for subsea production equipment[R]. OTC 16507, 2004.
- [41] DAVALATH J, STEVENS K. Cool-down thermal performance of subsea systems based on Gulf of Mexico field experience[R]. OTC 17972, 2006.
- [42] 刘珂, 高文凯, 洪迪峰, 等. 随钻仪器井下降温系统阻热性能研究[J]. 石油机械, 2020, 48(8): 23–30.
- LIU Ke, GAO Wenkai, HONG Difeng, et al. Study on thermal resistance performance of downhole cooling system of instrument while drilling[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(8): 23–30.
- [43] 刘珂, 苏义脑, 高文凯, 等. 随钻仪器井下降温系统冷却效果数值研究[J]. 石油机械, 2022, 50(7): 18–25.
- LIU Ke, SU Yinao, GAO Wenkai, et al. Numerical study on cooling effect of downhole cooling system of instrument while drilling[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(7): 18–25.
- [44] 刘珂, 高文凯, 窦修荣, 等. 随钻仪器井下降温系统传热特性研究[J]. 石油机械, 2022, 50(2): 23–32.
- LIU Ke, GAO Wenkai, DOU Xiurong, et al. Heat transfer characteristic study on downhole cooling system of drilling instrument[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(2): 23–32.
- [45] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.