

超万米特深井高温高压环境钻进关键难点

尹宇森^{1,2,3}, 孙友宏^{1,2,3,4}, 徐绍涛^{1,2,3*}, 徐良^{1,2,3}, 窦世超^{1,2,3}, 王之鸿^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083; 4. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:针对超万米特深井钻进过程中高温高压环境下钻头进尺难、钻具易失效、钻井风险高等问题, 本文从岩石脆延性转化、钻头磨损加剧、动力传递衰减、轨迹控制失准和钻井液高温失效5个方面, 对主要技术难点进行了系统讨论。结果表明, 超万米井下高温高压条件会改变岩石破碎机理, 使岩石由以脆性破坏为主逐渐向脆塑性耦合破坏转变, 增加破岩难度; 钻头在高温、高载荷和强磨蚀条件下磨损与失效风险显著增加, 使用寿命缩短; 长钻柱摩擦与振动导致地面动力传递效率下降, 井下动力钻具因密封、轴承及弹性元件性能劣化导致输出能力和工作可靠性下降; 垂钻工具则因电子元器件在高温高压下发生性能漂移或损坏造成轨迹控制失准; 高温还会导致钻井液流变性劣化、滤失性能和稳定性降低, 削弱其携岩、冷却和井壁稳定作用。超万米特深井钻进难点具有显著的多因素耦合特征, 其本质在于深部地层高温高压极端环境下, 钻具系统与钻井液的协同失效。因此, 未来需从多场耦合破岩机理、耐高温钻具关键材料及结构和智能钻井液体系等方面开展针对性研究, 为超深井钻探工艺优化与工具研发提供支撑。

关键词: 深地探测; 特深井; 高温高压; 岩石脆延性转化; 钻头磨损; 动力钻具; 垂钻工具; 钻井液

中图分类号: P634; TE245 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2026)04-0014-10

Key challenges in drilling under high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells exceeding 10000 m

YIN Yusen^{1,2,3}, SUN Youhong^{1,2,3,4}, XU Shaotao^{1,2,3*}, XU Liang^{1,2,3}, DOU Shichao^{1,2,3}, WANG Zhihong^{1,2,3}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China; 4. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: To address the challenges encountered during drilling in ultra-deep wells exceeding 10000 m, including low rate of penetration, frequent drilling tool failures, and elevated drilling risks under high-temperature and high-pressure (HTHP) conditions, this paper systematically discusses the major technical difficulties from five aspects: rock brittleness-ductility transition, accelerated bit wear, power transmission attenuation, trajectory control inaccuracy, and high-temperature drilling fluid failure. The results indicate that HTHP conditions in ultra-deep wells alter rock-breaking mechanisms, causing the failure mode to gradually shift from predominantly brittle fracture to coupled brittle-plastic deformation, thereby increasing rock-breaking difficulty. Meanwhile, drill bits are subjected to severe wear and a

收稿日期: 2026-04-20; 修回日期: 2026-06-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.002

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课题(编号: 2024ZD1000907); 国家自然科学基金项目(编号: U25B201409、U23A2025); 中央高校新教师基本科研能力提升项目(编号: 2652025021)

第一作者: 尹宇森, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为深部钻探高温高压环境岩石破碎机理, 北京市海淀区学院路29号, yinyusen@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 徐绍涛, 男, 汉族, 1995年生, 讲师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事深地、深海钻探工艺与机具及非常规能源勘探与开发等方面的工作, 北京市海淀区学院路29号, xust815@163.com。

引用格式: 尹宇森, 孙友宏, 徐绍涛, 等. 超万米特深井高温高压环境钻进关键难点[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 14-23.

YIN Yusen, SUN Youhong, XU Shaotao, et al. Key challenges in drilling under high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells exceeding 10000 m[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 14-23.

higher risk of failure under elevated temperatures, heavy loads, and highly abrasive formations, resulting in a shortened service life. Friction and vibration of long drillstring reduce the surface power transmission efficiency, and the performance and operational reliability of downhole motors decline due to the degradation of seals, bearings, and elastomeric components. Vertical drilling tools may experience trajectory control inaccuracies because of performance drift or failure of electronic components under HTHP conditions. In addition, high temperatures can deteriorate the rheological properties of drilling fluids and reduce their filtration performance and stability, thereby weakening their functions in cuttings transport, cooling, and wellbore stabilization. The challenges of drilling ultra-deep wells are characterized by significant multi-factor coupling, and fundamentally arise from the synergistic failure of drilling tool systems and drilling fluids under extreme downhole conditions, particularly the HTHP environments encountered in deep formations. Therefore, further research is needed on multi-physics coupled rock-breaking mechanisms, high-temperature-resistant materials and structural designs for drilling tools, and intelligent drilling fluid systems to support the optimization of drilling processes and tool development for ultra-deep wells.

Key words: deep earth exploration; ultra-deep well; high temperature and high pressure; brittle-ductile transition of rock; bit wear; downhole motor; vertical drilling tool; drilling fluid

0 引言

随着浅层易采油气与矿产资源可采储量逐步减少,能源资源的勘探开发正持续向深部、超深部推进;同时,为揭示地球深部物质组成及其演化过程,也迫切需要获取更深层的原位岩心样品与地质信息。深地探测不仅服务于能源资源安全,也支撑基础地质科学的发展。近年来,超深钻探,尤其是超过10000 m的钻探,已逐渐演变为开发深部能源与认识深部地球的重要途径。相较于间接的地球物理推断,钻探与取心能够提供更直接的样品、温压及结构信息,是连接深地科学认知与工程开发实践的关键手段。

然而,井深的不断增加伴随着地层温度、压力和应力的快速升高。近地表地温梯度通常为 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[1-2]}$,万米地层的温度上升至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,且深部沉积地层普遍存在超压现象,孔隙压力可显著高于静水压力,甚至超过其2倍。如图1^[3]所示,超万米特深井钻探面临的高温高压环境已成为制约提速增效与安全作业的瓶颈。高温高压会改变深部岩石的力学性质与破碎机理,使岩石强度、断裂韧性及脆延性转化特征更加复杂,从而增加破岩和井壁维稳难度;高温、冲击与磨损耦合作用会加剧钻头的热损伤与磨损,降低钻进效率并缩短其使用寿命;井下动力钻具需要同时满足耐高温、高扭矩输出与长寿命要求,其密封件、弹性体、轴承及传动部件的可靠性面临严峻考验;垂直钻井工具(简称垂钻工具)还需承受高温、强振动和复杂信号传输环境,井下电子元件易发生热失效,进而影响轨迹控制能力;此外,钻井液在高温高压、高盐和高应力

条件下还会出现流变性能恶化、滤失量增大、井壁失稳与漏失加剧等问题。由此可见,高温高压的影响并非只局限于单一工具,而是贯穿岩石破碎、动力传输、轨迹控制与钻井液循环全过程的系统性难题。

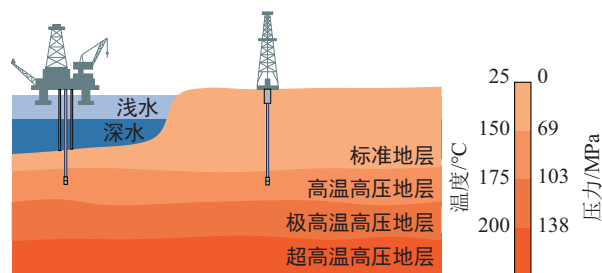


图1 高温高压地层分类^[3]

Fig.1 Classification of high-temperature and high-pressure reservoirs

基于此,本文围绕超万米特深井钻进过程中所面临的高温高压地层环境,系统梳理了岩石力学特性转化、钻头磨损失效、井下动力钻具适应性、垂钻工具可靠性及钻井液稳定性等关键难点,总结了相关研究进展与认识,在此基础上归纳了未来技术攻关方向,以期对超深井钻探工艺优化、钻井工具研发和现场工程实践提供参考。

1 岩石脆延性转化

有关高温高压条件下的岩石力学性质研究普遍认为,岩石在深部地层高温高压环境下强度升高^[4],同时变形破坏特性由脆性向延性转变。不同静水压(P_b)下的页岩岩屑如图2^[7]所示。芮旭升

等^[5]综合讨论了深层高温高压岩体剪切力学特性,发现常温至300℃区间内,干热岩受热膨胀效应影响,内部结构随温度上升而致密,宏观表现为岩石剪切强度增加。朱振南等^[6]认为,高温改变了岩石的微观结构,进而改变了岩石的宏观强度、变形特征和破坏形式。通过开展高温后三轴压缩条件下的花岗岩力学特性试验发现,100~300℃高温处理后,花岗岩的抗压强度和弹性模量随温度升高而减小,一方面是由于结晶水的析出破坏了矿物原有构造,另一方面,岩石内部各组分的膨胀系数不同导致微裂纹和孔隙增加。但在深部钻探作业中,岩石处于实时高温和压力条件,高温后再冷却可能会对岩石力学特性产生影响。

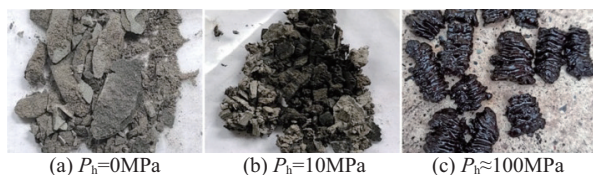


图2 不同静水压下的页岩岩屑^[7]

Fig.2 Cuttings of shale obtained under different hydrostatic pressures

Ma等^[8]开展了实时高温和三轴应力条件下的花岗岩力学性质试验,结果表明:常温至300℃,花岗岩的峰值强度呈先升高后降低的趋势,如图3^[9]所示,且温度阈值随水平应力增大而提高;同时,低围压、室温下花岗岩呈典型脆性破坏特征,随着温度和围压增加,花岗岩脆性特征逐渐减弱,峰后曲线略向延性过渡。马英文等^[10]基于高温高压真三轴试验,研究了深部条件下花岗岩变形破坏的能量演化规律。结果表明,温度、应力和中间主应力都会显著影响岩石的破坏特征及能量变化。其中,温度对破坏能量的影响具有明显应力依赖性:低应力下升温使岩石延性增强、破坏耗能增加,高应力下则使岩石脆性增强、破坏耗能降低。随着应力增大,岩石破坏所需能量总体呈增加趋势,且破裂模式逐渐由拉张-剪切混合型向剪切型转变。Zhang等^[11]利用高温高压三轴测试装置系统研究了深部岩石在高温高压条件下的力学响应。结果表明:围压升高总体上增强岩石强度,而温度升高总体上削弱岩石强度,但不同岩性的弹性模量、泊松比等参数对温压的响应存在显著差异。此外,高温还会促进张

裂纹和轴向劈裂出现,表明深部岩石在高温高压环境下的破坏机制更加复杂。

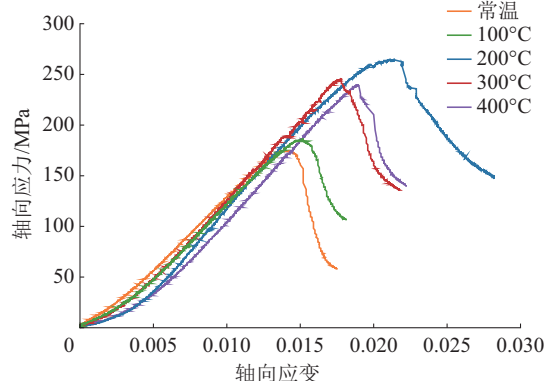


图3 花岗岩在实时高温和三轴应力作用下的力学性能^[9]

Fig.3 Mechanical properties of granite under real-time high temperature and three-dimensional stress

另有学者从岩石与切削齿相互作用机制的角度研究岩石破碎特征的变化。Dai等^[12]研究发现,温度对花岗岩的力学性能影响显著,高温会导致花岗岩的破碎形式由脆性破坏转变为塑性破坏,在240~360℃时钻进效率明显降低,限制了PDC钻头切削齿的切削深度,加剧了钻头磨损。Liu等^[7]研究了静水压下PDC切削齿的碎岩机理,结果表明,静水压的存在使得岩石由脆性向延性转变。20 MPa静水压、5 MPa围压下岩屑粒度小,基本呈粉末状,甚至出现泥化现象;同时,破碎岩石消耗的机械比能高,切削深度为1 mm时机械比能约为常压下的14.6倍。

由此可见,特深井高温高压环境会显著改变岩石的强度、变形及破坏特征,使岩石破碎机理由常规条件下的脆性破坏逐渐向脆塑性耦合破坏转变。这种岩石力学特性和破坏形式的变化不仅使破岩能耗和机械比能显著增加,还降低了钻进效率和钻头使用寿命,是特深井高效钻进面临的重要基础性难题。

2 钻头磨损加剧

钻头是钻探作业的核心钻具,其性能和工作状态直接影响钻进效率。现场作业表明,深井中钻进钻头磨损增大(图4),进尺缓慢。正常钻进时,孕镶金刚石钻头胎体磨损均匀,金刚石颗粒出露良好。深部高温高压环境下,孕镶金刚石钻头磨削岩石产

生热量,同时钻井液温度较高,钻头与钻井液之间的热量交换降低,钻井液冷却效果差,会导致钻头非正常磨损甚至烧钻。Mostofi等^[13]从孕镶金刚石钻头破岩机理的角度提出,当磨钝的金刚石颗粒脱落,胎体与岩石直接接触,这一过程虽然短暂,但会使界面温度显著升高,严重时发生烧钻。吴海东^[14]利用高温钻进试验装置开展了实时高温条件下孕镶金刚石钻头钻进不同种类岩石的试验,结果表明,对于孕镶金刚石钻头,高温下胎体黏结剂软化导致耐磨性降低,同时温度升高加剧唇面金刚石颗粒脱落,导致钻头磨损加重,缺陷增多。



图4 钻井现场PDC钻头磨损情况

Fig.4 Wear condition of PDC bits at drilling site

与孕镶金刚石钻头不同,聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)钻头的磨损问题更加集中地体现在切削齿局部失效。在深部和超深部钻井中,PDC作为主要破岩元件,直接承受高温与地层的强研磨作用。高温环境下,PDC失效表现为磨损加剧、热损伤、切削齿退化,导致钻进效率下降。PDC对高温较为敏感,核心原因是其常用黏结相钴在高温条件下作为催化剂促进金刚石发生石墨化或非晶化,削弱热稳定性^[15]。随着钻进温度升高,钴的热催化作用、热膨胀失配和热残余应力会共同促使PDC产生微裂纹甚至失效。进一步的定量研究还表明,PDC中的残余钴含量越高,其耐磨性往往越差,不额外加入钴粉的样品反

而表现出更好的抗磨损能力^[16]。从摩擦学行为看,PDC钻头的高温磨损伴随着磨损机制的转变。Gou等^[17]在200~400℃条件下对去钴PDC开展摩擦磨损试验,发现随温度升高,摩擦系数和磨损率整体上升,耐磨性下降;此外,XRD未检出明显石墨相,说明去钴处理能够有效抑制高温石墨化。Cao等^[18]进一步将测试温度扩展到25~600℃,发现PDC的摩擦系数在200℃以下随温度升高而降低,但在200℃以上又转而升高,说明高温区间界面状态和主导失效机制已发生明显变化。此外,高温冲击磨损研究表明,温度升高会显著削弱PDC的抗冲击能力,350℃时能量吸收率可达93.07%,并伴随钻挤出等现象,最终降低切削齿抗冲击性能^[19]。Ma等^[20]开展了热-力-切削齿温升耦合作用下PDC钻头的磨损规律研究,发现温度会显著放大磨损程度,相同工况下,考虑温度作用时PDC钻头的磨损约为不考虑温度作用的2倍。此外,750℃时聚晶层表面析出大量钴的氧化物,其强度和硬度均被破坏,导致PDC钻头在高温环境中磨损加剧。

总的来说,高温高压环境导致的钻头的磨损加剧和失效,是制约钻探作业向超深层发展的重要因素之一。井下极端工况下,孕镶金刚石钻头胎体软化、金刚石颗粒脱落、散热能力降低,PDC钻头黏结相退化、热应力累积、抗冲击性能下降。虽然特深井高温高压环境对不同种类钻头工作性能的影响有所区别,但最终均会降低钻头的破岩效率,缩短其使用寿命。

3 动力传递衰减

特深井钻进中,动力传递衰减已成为制约提速增效与安全钻进的关键环节之一。一方面地面动力系统输出的扭矩和钻压需经长钻柱传递到钻头,在此过程中会受到井壁摩阻、钻柱弯曲、扭转弹性变形及振动等因素影响,动力从地面传至井底的过程中发生了多级衰减;另一方面,井下动力钻具在高温高压环境中又会因材料劣化、密封失效、摩擦副磨损和结构疲劳等导致动力输出下降甚至失效。

3.1 地面驱动

对于由地面顶驱或转盘提供旋转动力的钻进方式,钻头所需扭矩和钻压必须通过长钻柱向井底传递。经典的扭矩-摩阻模型指出,定向井和深井中的扭矩与摩阻主要来源于钻柱与井壁之间的滑

动摩擦^[21]。在井斜角、狗腿度和井眼曲率增大时,钻柱与井壁接触产生的法向力增加,从而导致附加扭矩和轴向阻力同步上升。这一问题在长井段和复杂井眼中尤为突出。在大斜度井和水平井中,摩阻不仅会使钻柱总体扭矩升高,还会显著降低钻压传递效率。Zhu等^[22]对不同井型钻柱动态扭矩与摩阻的分析显示,复杂曲线井段的接触摩擦强度明显高于常规井段,且井型越复杂,钻压传递效率越低。相应地,过大的摩阻会造成钻头吃入深度不足、机械钻速下降,并增加钻柱扭断风险。Wang等^[23]研究表明,随着水平段长度增加,轴向力难以有效传递到钻头,附加摩阻会带来较低的钻速、较差的工具面控制能力及更大的定向施工难度。

除静态摩阻外,超深井长钻柱还更容易发生显著的扭转弹性变形和黏滑振动。Tang等^[24]指出,黏滑振动发生时,井底钻具组合呈现周期性“卡滞-释放”,在释放阶段井底转速可达地面转速的数倍。这种强烈的不稳定扭转会缩短工具寿命、增加非生产时间,并降低机械钻速。Sharma等^[25]的研究也表明,黏滑振动属于典型的扭转振动问题,仅依靠单一控制手段往往难以彻底抑制,其对深井和超深井钻进过程的效率、可靠性和安全性影响尤为显著。对于特深井而言,即使地面设备具备足够输出能力,井底获得的实际扭矩和转速仍可能因钻柱弹性储能与振动耗散而明显偏离设计值。

因此,地面驱动在特深井中的性能下降,本质是长传动链条件下的机械能传递效率下降,主要表现为:(1)井壁摩阻增大导致钻压和扭矩沿钻柱传递过程中持续损失;(2)长钻柱扭转变形使地面参数与井底响应出现偏差;(3)黏滑等振动加剧工具磨损与能量耗散,最终降低钻头有效破岩能力。

3.2 井下动力

与地面驱动方式相比,井下动力钻具可在井底直接将钻井液的液压能转化为机械能,从而减轻部分钻柱传动负担。当前应用最广的井下动力钻具是螺杆钻具(Positive Displacement Motor, PDM)^[26],如图5^[27]所示,其输出性能与压降、流量、转子-定子几何参数及钻井液性质密切相关。Koulidis等^[28]有关PDM性能预测的研究表明,PDM的理论扭矩与压降直接相关,而井下实际工况中的流量波动、井眼摩阻、转子-定子磨损和地层变化会使实际输出性能与额定性能产生偏差。特别是当

定子的橡胶衬套老化后,体积效率下降,动力段压差和输出到钻头的机械能都将减小。

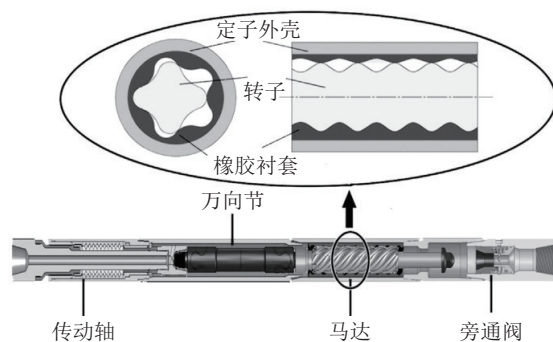


图5 螺杆钻具结构^[27]

Fig.5 Structure of PDM

在特深井高温高压环境下,螺杆钻具的性能下降主要源于橡胶定子及相关弹性体材料的热失效。Delpassand^[29]讨论了PDM的定子失效机制及寿命影响因素。结果显示,定子寿命受转子/定子设计、井下温度、钻井液、转速和压差等多种因素控制。随着温度升高,弹性体性能降低,且井下高温会使定子弹性体膨胀,从而改变转子-定子过盈配合并缩短使用寿命。Han等^[27]的研究进一步表明,PDM橡胶衬套的热失效与热-力耦合密切相关,黏弹性迟滞发热是导致衬套热失效的重要原因。此外,王春阳等^[30]讨论了温度对螺杆钻具性能的影响,提出定子橡胶与钢管之间的黏结剂也会因井温升高致使黏结效果急剧下降,进而导致脱胶。

除高温外,高压和压差载荷会进一步加剧井下动力钻具的结构退化。Zhang等^[31]对动力段的故障原因进行了分析,结果表明,磨损和腐蚀是转子主要的失效形式,橡胶衬套则会发生磨损、撕裂、破裂、剥离、热失效和疲劳失效。此外,钻井液压力、压差、橡胶硬度和壁厚等因素均会显著影响衬套的应力与变形分布。Tavosi等^[32]借助数值模拟和物理实验表征了井下马达橡胶衬套的裂纹扩展模式,证明材料类型、裂纹长度和载荷变化对橡胶衬套的裂纹扩展具有显著影响。Najafabadi等^[33]和Kuang等^[34]关于PDM评价体系的研究指出,PDM定子橡胶劣化并非单一热作用所致,而是热-力-化多因素共同作用的结果。高温、高压、化学环境及循环载荷共同促进了膨胀、老化和疲劳损伤,最终导致动力输出下降、失效风险上升。

总而言之,随井深不断增加,动力从地面传递至井底的过程中因摩擦阻、钻杆变形及振动耗散而损失,导致钻压和扭矩利用率降低。井底高温高压环境又会加速井下动力钻具弹性体老化、磨损与疲劳,致使输出性能下降、工作寿命缩短。

4 轨迹控制失准

垂钻工具是深井和特深井易斜地层中控制井眼轨迹、提高井身质量的重要井下工具之一^[35]。按照轨迹控制方式不同,现有垂钻工具大致可分为推靠式和指向式两类。其中,推靠式工具主要通过液压推靠机构对井壁施加侧向力实现纠偏,指向式工具则主要通过改变钻头指向实现井眼轨迹控制^[36]。现阶段工程上应用较多的垂钻系统以推靠式为主,本质上是以井下测量-控制-液压执行为核心,通过电源子系统、测控子系统和液压执行子系统构成井下闭环纠偏体系。但随着井深增加,井下环境逐渐呈现高温、高压、强振动、强冲击和长时间连续作业等特征,垂钻工具的工作条件显著恶化,其失效形式也由单一零部件损坏演变为测量漂移、控制失稳、执行迟滞、纠斜能力下降和整机寿命缩短等综合性问题。

高温是当前垂钻工具可靠性下降的首要因素。无论是推靠式还是指向式垂钻系统,内部往往集成了用于姿态测量、控制等大量对温度敏感的电子元件。常规电子元件通常在150℃以上就会进入明显的性能衰减区,而深部井下环境温度可超过205℃^[37]。这种热环境会影响井斜测量与控制链路,使加速度计、姿态测量单元、控制电路和供电模块易出现参数漂移、热老化及寿命下降等问题,从而削弱井下偏斜识别和闭环纠偏的准确性^[38]。Sun等^[39]对高温高压深井垂钻系统选型的研究也指出,现有垂钻系统虽然已基本能够满足部分中深井段的防斜打直需求,但电子元件的可靠性仍是需要进一步突破的关键短板之一。

高压对垂钻工具的影响,更多体现在与高温的共同作用下对工具舱体承压、绝缘密封和井下长期稳定性的持续削弱。推靠式垂钻系统依赖井下闭环控制和液压执行来完成纠偏动作,一旦高温高压环境导致电子舱隔热能力下降、密封失效或内部元件长期处于超设计工况,测量与控制系统就容易出现功能退化,严重时甚至导致工具停机。此外,特

深井中高压钻井液环境还会提高执行元件的工作载荷,并与高温、磨粒和循环冲蚀共同作用于推靠部件和指向机构,降低垂钻系统纠斜动作的一致性和重复性^[40]。

除温压因素外,特深井硬地层钻进中普遍存在的振动和冲击会进一步放大垂钻工具的失效风险^[41]。垂钻工具通常安装在近钻头位置,作业过程中会受到轴向、横向和扭转振动等多种载荷影响,这些振动会直接影响工具的响应精度和工作稳定性。对垂钻系统而言,即便高温高压尚未导致元件立即损坏,强振动环境也可能通过扰动测量信号、破坏控制时序、加剧连接部位疲劳和放大执行机构磨损,导致工具纠斜效率下降、工作状态动态波动,最终缩短其井下服役寿命^[42]。机械式垂直钻井系统工作原理如图6^[43]所示。

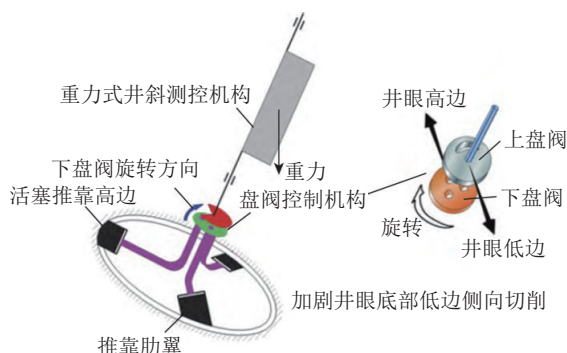


图6 机械式垂直钻井系统工作原理示意^[43]

Fig.6 Operational principle of mechanical vertical drilling system

综上,特深井垂钻工具的失效是高温、高压与振动冲击共同作用的结果。针对电子元器件在特深井高温高压高振动极端环境下可靠性受限的问题,行业内正在发展机械式/全金属垂钻工具及弱电子化垂钻方案,以降低对高温敏感电子元器件的依赖。

5 钻井液高温失效

在特深井钻进过程中,钻井液承担携带岩屑、冷却与润滑钻具、传递水力能量、平衡地层压力及稳定井壁等多重功能,其性能直接影响井筒压力控制、井眼清洁效率、机械钻速和井下工具的服役状态。随井深增加,井底温度和压力通常显著升高,钻井液可能发生密度、流变性、滤失特性及沉降稳

定性的系统性劣化^[44]。相较于压力效应,温度通常是引起钻井液性能劣化的主要扰动因素之一,而高压则可能进一步改变其密度、凝胶强度、屈服行为和沉降稳定性,使钻井液在井下极端工况表现出与常规实验测试不同的流变和滤失特征^[45-46]。

高温对钻井液最直接的影响,是破坏其原有的流变性能、乳化稳定性和滤失控制能力^[47-48]。如图7^[49]所示,不同类型的钻井液在高温环境下表现出不同的失效特征,水基钻井液主要表现为聚合物热降解和黏土结构失稳,油基钻井液则主要表现为乳化体系稳定性下降和加重材料沉降加剧。特深井高温工况下,水基钻井液中部分聚合物可能发生分子链断裂、水解、氧化降解或构象变化,导致其水化能力、吸附能力和空间位阻效应减弱,进而引起表观黏度、塑性黏度和屈服值下降,携岩能力减弱,滤失量增加^[50-51]。部分常规合成聚合物在130℃以上即可出现不同程度的性能衰减^[52]。与此同时,高温还可能使某些碱性处理剂或盐类诱发异常胶化、絮凝或结构重构,使体系黏度不降反升,出现循环阻力增大、泵压升高和流变难以预测等问题^[53]。此外,高温还可能改变黏土颗粒表面的水化状态、颗粒间作用力及体系中离子平衡,使水基钻井液出现异常增稠、絮凝或高温胶凝现象^[54]。



(a)水基钻井液受污染
后泥饼质量变差

(b)油基钻井液长时间
静止后体系失稳

图7 超高温条件下常规钻井液失效^[49]

Fig.7 Failure of conventional drilling fluid under ultra-high temperature conditions

对于油基和合成钻井液,高温失效主要涉及乳液稳定性下降、流变调控网络弱化、滤失量显著增加及加重材料沉降风险增加。高温老化可能导致乳化剂分子降解或界面活性降低,并改变有机土在油相中的分散状态及其形成的空间网络结构,从而引起电稳定性下降、黏度和切力波动,严重时出现

油水相分离或异常胶凝。与此同时,有机土表面的改性剂脱附、分解,增黏提切作用失效,钻井液流变性能恶化,处理剂交联、降解,致使钻井液体系黏度剧变。在高密度油基钻井液中,加重材料沉降是高温高压条件下尤为突出的工程风险。温度升高可能导致连续相黏度下降和低剪切结构强度减弱,使加重颗粒更容易发生重力沉降,与此同时,颗粒粒径分布、固相体积分数、颗粒间相互作用、井斜角、静置时间和循环状态也会显著影响沉降行为。在斜井、水平井中,沉降倾向往往更加明显,并可能造成井筒密度分布不均、等效循环密度波动和压力控制窗口收窄,进而增加井漏、溢流、卡钻及井壁失稳等风险^[54-55]。

然而,特深井钻井液的性能演化并非单纯的高温老化过程。随着井深增加,井底压力持续升高,钻井液会发生明显的体积压缩变形,同时会影响其微观结构和屈服行为,并与温度效应形成显著耦合。对于水基钻井液,随着井底温度和压力升高,其密度、黏度、介电性质及离子化行为均会发生变化。在部分超高温高压工况下,水相可能呈现加压热水或亚临界水的部分物性特征:随温度升高,介电常数和黏度总体呈下降趋势,溶剂极性及其溶解能力随之改变;水的离子积常数则随温度和密度发生显著变化,影响体系中的酸碱平衡、离子反应及水解过程。水基钻井液物性变化可能影响聚合物水解与降解、黏土颗粒分散状态及处理剂之间的相互作用,增加其性能调控的复杂性^[56]。

一定范围内,压力对油基钻井液和合成基钻井液在流动状态下表观黏度的影响弱于温度效应,但其对凝胶强度、储能模量、屈服应力及固态特性的影响却更值得关注^[57]。Palaoro等^[58]以反相乳化钻井液为研究对象,考察了压力对流变行为的影响。结果表明,压力升高会使钻井液屈服应力、凝胶强度和屈服应变总体呈增加趋势。由于特深井安全密度窗口窄,这种变化可能显著影响井筒压力控制精度。此外,高压还会通过改变钻井液密度和压缩变形,进一步影响井底压力控制。井下钻井液密度并不等同于地面常温常压条件下测得的初始密度,在高温高压井中,温度引起的热膨胀和压力引起的压缩效应会共同改变流体静液柱压力、环空压耗与等效循环密度。因此,若仍基于地面常温常压性能参数进行井控设计,可能导致井底循环压力预测出

现偏差^[59]。

总体而言,特深井钻井液的性能劣化,并非单一的高温失效过程,而是热降解、胶体结构变化、流变失稳、滤失控制能力下降、加重材料沉降和温压耦合物性变化共同作用的结果。高温通常是引发处理剂降解和体系失稳的主要因素,高压则进一步扩大其井下性能与地面测试结果之间的差异,使凝胶强度、屈服行为、密度和井筒水力学更加复杂。

6 结论与展望

超万米特深井高温高压环境下,钻探作业的关键难点集中在地层、钻具、钻井液三个方面,呈现出明显的多因素耦合特征,主要包括:(1)深部高温高压条件改变了岩石强度、变形与破坏特征,使岩石破碎机制由以脆性破坏为主逐渐向脆塑性耦合破坏转变,导致破岩能耗和机械比能增加;(2)高温、高载荷与强磨蚀环境加速了钻头磨损与热损伤,引发切削齿磨损、开裂及局部失效,最终造成钻头寿命缩短、钻进效率下降;(3)长钻柱动力传递过程中,摩阻增大、扭转变形及黏滑振动等问题导致钻压和扭矩传递效率下降,井下动力钻具在高温高压下易出现弹性体老化、密封失效及性能衰减;(4)垂钻工具对电子测控系统依赖较强,在高温高压及振动冲击环境下易发生测量漂移、控制失稳和执行能力下降,制约了井眼轨迹控制精度与工具服役寿命;(5)钻井液在高温高压下易发生热降解、流变失稳、滤失增大及加重材料沉降等问题,井下实际性能与地面评价结果差异增大,从而削弱其携带岩屑、冷却与润滑钻头、稳定井壁的作用。

针对上述难点,未来超万米特深井钻进技术研究可重点围绕以下几个方面开展:(1)加强深部岩石在实时高温高压条件下的力学响应与破坏机理研究,明确温压耦合作用下岩石脆延性转化规律,为高效破岩参数优化提供理论支撑;(2)发展耐高温、耐磨损钻头材料与结构设计方法,提升切削齿在极端工况下的抗热损伤和抗磨损能力;(3)提升动力传递系统可靠性,优化长钻柱动力传输与振动控制技术,推进耐高温井下动力钻具及关键材料的研发;(4)推动垂钻工具向耐高温电子、高可靠测控及机械式/全金属化方向发展,提高特深井环境下的轨迹控制能力;(5)加强抗高温钻井液关键材料与智能钻井液技术研发,重点突破耐高温处理剂、

高温稳定加重材料和高温乳化体系等核心材料,提高钻井液在特深井复杂温压条件下的自适应调控能力和综合服役性能。

参考文献(References):

- [1] 何丽娟,胡圣标,杨文采,等.中国大陆科学钻探主孔动态地温测量[J].地球物理学报,2006,49(3):745-752.
HE Lijuan, HU Shengbiao, YANG Wencai, et al. Temperature measurement in the main hole of the Chinese continental scientific drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 745-752.
- [2] 王贵玲,蔺文静.我国陆区热状态及控热要素[J].地学前缘, 2024, 31(6):1-18.
WANG Guiling, LIN Wenjing. The thermal status of China's land areas and heat-control factors[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6):1-18.
- [3] Yin Y S, Sun Y H, Xu L, et al. Development status and prospect of performance testing equipment for drilling tools in high-temperature and high-pressure environments[J/OL]. SPE Journal, 2026; 1-18 (2026-05-28) [2026-06-05]. <https://doi.org/10.2118/233781-PA>.
- [4] 谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (4) : 110-117.
- [5] 芮旭升,杨青帅,周传洪,等.深部高温高压岩体剪切力学特性研究进展[J].矿产保护与利用,2025,45(2):1-13.
RUI Xusheng, YANG Qingshuai, ZHOU Chuanhong, et al. Research progress on shear mechanical properties of deep high-temperature and high-pressure rock mass[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2):1-13.
- [6] 朱振南,梁缘,解经宇,等.高温后花岗岩三轴压缩条件下力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2026,48(1):33-44.
ZHU Zhenan, LIANG Yuan, XIE Jingyu, et al. Experimental investigation on mechanical behaviors of granite specimens after thermal treatment under conventional triaxial compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2026, 48 (1) : 33-44.
- [7] Liu W J, Deng H X, Zhu X H. The rock fragmentation mechanism in rock cutting with PDC cutter under hydrostatic pressures [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(9):6861-6879.
- [8] Ma X, Wang G L, Hu D W, et al. Mechanical properties of granite under real-time high temperature and three-dimensional stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 136:104521.
- [9] 胡大伟.花岗岩在实时高温和三维应力作用下的力学性能数据集[EB/OL]. (2023-04-27) [2026-03-12]. <https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/f860c807-4651-41a7-aff3-2bc3a187f8dd>.
HU Dawei. Mechanical property data set of granite under real-time high temperature and three-dimensional stress [EB/OL]. (2023-04-27) [2026-03-12]. <https://www.ncdc.ac.cn/>

- portal/metadata/f860c807-4651-41a7-aff3-2bc3a187f8dd.
- [10] 马英文,付兴,吴怡,等.高温高压真三轴加载条件下花岗岩变形破坏的能量演化规律研究[J].工程地质学报,2025,33(5):1659-1672.
MA Yingwen, FU Xing, WU Yi, et al. Energy evolution mechanisms in granite deformation and failure under high-temperature and high-pressure true triaxial loading conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(5): 1659-1672.
 - [11] Zhang P, Mishra B, Heasley K A. Experimental investigation on the influence of high pressure and high temperature on the mechanical properties of deep reservoir rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2197-2211.
 - [12] Dai X W, Huang Z W, Shi H Z, et al. Experimental investigation on the PDC cutter penetration efficiency in high-temperature granite[J]. Geothermics, 2022, 98: 102281.
 - [13] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits[J]. Wear, 2018, 410/411: 34-42.
 - [14] 吴海东. 高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WU Haidong. Experimental research on diamond bit drilling under high temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
 - [15] Hou D X, Meng D Z, Kang J J, et al. Anomalous tribology at high temperatures: How high-entropy alloys defy conventional wisdom in polycrystalline diamond compacts[J]. Wear, 2026, 589: 206548.
 - [16] Gu J T, Huang K. Role of cobalt of polycrystalline diamond compact (PDC) in drilling process[J]. Diamond and Related Materials, 2016, 66: 98-101.
 - [17] Gou R Y, Zhao J W, Luo X. Tribological behavior of PDC-CR at different temperatures[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 144: 110950.
 - [18] Cao T, Sun B, Qiu B, et al. Investigation of the friction and wear characteristics of polycrystalline diamond compact in a wide temperature range[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 145: 111130.
 - [19] Guo Y Z, Meng D Z, Yue W. Temperature effects on the impact wear performance of polycrystalline diamond compacts: Dynamic response analysis and damage mechanism[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2026, 136: 107574.
 - [20] Ma Y C, Xie X F, Rong Z, et al. Study on dynamic wear law of PDC bit under temperature effect[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 230: 212237.
 - [21] Johancsik C A, Friesen D B, Dawson R. Torque and drag in directional wells-prediction and measurement[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(6): 987-992.
 - [22] Zhu X H, Li K, An J W. Calculation and analysis of dynamic drag and torque of horizontal well strings[J]. Natural Gas Industry B, 2019, 6(2): 183-190.
 - [23] Wang X M, Chen P, Huang W, et al. Development of torque clutch drilling tool and evaluation of drag reduction performance[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(10): 168781401880665.
 - [24] Tang L P, Guo B L, Zhu X H, et al. Stick-slip vibrations in oil well drillstring: A review[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2020, 39(4): 885-907.
 - [25] Sharma A, Abid K, Srivastava S, et al. A review of torsional vibration mitigation techniques using active control and machine learning strategies[J]. Petroleum, 2024, 10(3): 411-426.
 - [26] Nguyen T C, Al-Safran E, Nguyen V. Theoretical modeling of positive displacement motors performance[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 188-197.
 - [27] Han C J, Zhang J, Liang Z. Thermal failure of rubber bushing of a positive displacement motor: A study based on thermo-mechanical coupling[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1/2): 489-493.
 - [28] Koulidis A, Ahmed S. Positive Displacement Motor Condition and Performance Prediction Using Surface and Downhole Sensor Data[M]//Irawan S. Exploring the World of Drilling. London: IntechOpen, 2024: 95-114.
 - [29] Delpassand M S. Stator life of a positive displacement downhole drilling motor[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1999, 121(2): 110-116.
 - [30] 王春阳,李连强,李良君,等.井温对螺杆钻具使用性能的影响[J].石油矿场机械,2012,41(11):9-11.
WANG Chunyang, LI Lianqiang, LI Liangjun, et al. Influence of temperature on performance of screw drill[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(11): 9-11.
 - [31] Zhang J, Han C J, Liang Z. Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 414-423.
 - [32] Tavosi S, Alimardani M, Ghoreishy M H R, et al. Fatigue failure modeling in rubber stator of downhole motors: Dependency to materials and geometry, and its application to life prediction[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 159: 108072.
 - [33] Najafabadi A H, Chalice B A. A coupled FSI-experimental framework for multi-factor degradation assessment of PDM stator elastomers: Synergistic effects of thermo-mechanical and chemical stresses[J/OL]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. [2026-03-12]. <https://sage.cnpereading.com/doi/10.1177/14644207251414960>
 - [34] Kuang Y C, Zhou J P. Performance evaluation for positive displacement motors by combining fluid-structure interaction simulations and experiments[J]. SPE Journal, 2025, 30(1): 152-168.
 - [35] 张恒春,曹龙龙,王文,等.万米科学特深井防斜纠斜技术方案及研究建议[J].钻探工程,2024,51(4):31-37.
ZHANG Hengchun, CAO Longlong, WANG Wen, et al. Technical scheme and research suggestion of deviation prevention and correction for myriametric extra-deep scientific well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 31-37.
 - [36] 柴麟,张凯,刘宝林,等.自动垂直钻井工具分类及发展现状[J].石油机械,2020,48(1):1-11.
CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 1-11.
 - [37] Verma S, Elias Q. Thermal management of electronics used in downhole tools[C]//SPE Annual Technical Conference and

- Exhibition. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 2012:SPE-159737-MS.
- [38] Geng H, Xie Y J, Liu Q B, et al. Review of technological breakthroughs and industrial chain synergy innovations in China's domestic high-temperature high-pressure rotary steerable drilling system: A global context[J]. *Processes*, 2025, 13(9): 2968.
- [39] Sun W G, Song W Q, Ni H J, et al. Progress of automatic vertical drilling systems: Selection for deep wells with high temperature and pressure in China[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1965(1):012016.
- [40] Geng H, Zhang B Z, Xie Y J. Rotary steerable drilling technology: Bottlenecks breakthroughs and intelligent trends in China shale gas development[J]. *Processes*, 2025, 13(11):3471.
- [41] 惠坤亮, 吴小雄, 游娜, 等. 推靠式垂直钻井工具机械系统关键技术分析[J]. *机械工程师*, 2021(1):122-124.
- HUI Kunliang, WU Xiaoxiong, YOU Na, et al. Key technologies analysis on mechanical system of push-the-bit vertical drilling tool[J]. *Mechanical Engineer*, 2021(1):122-124.
- [42] Tian J L, Dheyaa A. State-of-the-art review on automatic vertical drilling tools: Addressing vibrational load challenges in oil and gas operations [J]. *Results in Engineering*, 2025, 25: 104416.
- [43] 孙友宏, 徐良, 薛启龙, 等. 海洋深层钻井关键理论与技术发展现状及展望[J]. *石油钻探技术*, 2025, 53(3):1-10.
- SUN Youhong, XU Liang, XUE Qilong, et al. Current status and prospects of key theories and technologies for marine deep drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(3):1-10.
- [44] 孙金声, 蒋官澄. 钻井工程“血液”——钻完井液技术的发展现状与趋势[J]. *前瞻科技*, 2023, 2(2):62-74.
- SUN Jinsheng, JIANG Guancheng. Development status and trend of drilling and completion fluid: "Blood" of drilling projects [J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(2): 62-74.
- [45] Sun J S, Yang J B, Bai Y R, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 1022-1034.
- [46] 庞少聪, 安玉秀, 田野. 抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议[J]. *钻探工程*, 2024, 51(4):82-92.
- PANG Shaocong, AN Yuxiu, TIAN Ye. Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(4):82-92.
- [47] Balaga D K, Kulkarni S D. A review of synthetic polymers as filtration control additives for water-based drilling fluids for high-temperature applications[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 215(Part B):110712.
- [48] Mohamed A, Salehi S, Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review [J]. *Geothermics*, 2021, 93:102066.
- [49] 孙金声, 王韧, 龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(1):1-30.
- SUN Jinsheng, WANG Ren, LONG Yifu. Challenges, developments, and suggestions for drilling fluid technology in China [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(1):1-30.
- [50] Akpan E U, Enyi G C, Nasr G, et al. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 175:1028-1038.
- [51] 熊正强, 邹志飞. 耐240℃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.
- [52] 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.
- [53] Vivas C, Salehi S. Rheological investigation of effect of high temperature on geothermal drilling fluids additives and lost circulation materials[J]. *Geothermics*, 2021, 96:102219.
- [54] Wang F H, Tan X C, Wang R H, et al. High temperature and high pressure rheological properties of high-density water-based drilling fluids for deep wells [J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(3):354-362.
- [55] Adjei S, Elkaktatny S, Sokama-Neuyam Y A, et al. Evaluation and remediation techniques for barite sagging: A review [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 225:211731.
- [56] Mao H, Yang Y, Zhang H, et al. A critical review of the possible effects of physical and chemical properties of subcritical water on the performance of water-based drilling fluids designed for ultra-high temperature and ultra-high pressure drilling applications [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187:106795.
- [57] Gautam S, Guria C, Rajak V K. A state of the art review on the performance of high-pressure and high-temperature drilling fluids: Towards understanding the structure-property relationship of drilling fluid additives[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213:110318.
- [58] Palaoro G, Andrade D E V, Galdino J F, et al. Influence of pressure on the gel strength and on the solid-like behavior for an inverted emulsion drilling fluid [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219:111114.
- [59] Gjerstad K. Water density-pressure-temperature modeling for drilling fluids in real-time HPHT applications [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 244:213420.

(编辑 王跃伟)