

高温高压地层钻井液失水控制与井壁稳定技术研究

白兴文

西部钻探钻井液分公司 新疆 克拉玛依 834000

【摘要】：高温高压地层钻井作业中，钻井液失水控制与井壁稳定是保障工程安全高效推进的核心难题。此类地层温度高、压力大、地质复杂，易引发滤失量超标、井壁坍塌等故障，严重影响钻井周期与成本。本文提出融合新型处理剂优选、钻井液体系优化及井壁强化技术的综合方案：通过建立地层环境-钻井液性能-井壁稳定性关联数据库，研发抗高温降滤失剂与防塌封堵剂，优化钻井液配方，并结合物理模拟与现场测试验证效果。结果显示，优化后钻井液在 180-220°C、15-20MPa 条件下，API 滤失量控制在 5mL 以内，岩心稳定率达 94.2%，显著优于传统技术。研究成果可降低井下故障发生率，为钻井工程提供科学支撑，对推动钻井工程高效安全发展具有重要意义。

【关键词】：高温高压地层；钻井液；失水控制；井壁稳定；钻井工程

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.024

引言

随着油气勘探向深部发展，高温高压地层钻井日益增多，面临岩石力学复杂、孔隙压力异常等挑战。钻井液在高温高压下易发生降解和交联结构破坏，导致滤失量增大、滤饼质量下降，进而引起井壁水化膨胀和坍塌。数据显示，该类地层中相关井下复杂情况占比超过 40%，平均单井延误 15 - 30 天，经济损失达数百万元。传统处理剂难以适应高温高压条件，存在降滤失剂易分解、防塌封堵效果不足等问题。为此，研究从处理剂研发、体系优化和井壁强化三个方向展开，通过建立关联模型、研制高效处理剂、优化钻井液配方，结合物理模拟与现场试验，形成一套高温高压钻井液综合技术，以提升井壁稳定性和作业安全性，支撑深部油气经济有效开发。

1 背景与现状

1.1 高温高压地层的重要性与地质特征

高温高压地层是深部油气资源的重要载体，全球储量占比超 60%，具有储量大、产能高的特点，我国四川盆地、塔里木盆地等区域开发潜力巨大。其地质特征显著：温度压力协同升高，深部地层温度常超 180°C、压力达 15-25MPa；岩性复杂，以泥页岩、砂岩为主，含膏盐层等夹层，泥页岩水化敏感性强；孔隙压力与地应力分布不均，易出现异常高压带；地层流体活跃，多相流体易与钻井液相互作用，这些特征叠加增大了钻井液失水控制与井壁稳定难度。

1.2 技术必要性与挑战

钻井液失水控制与井壁稳定是核心技术环节：有效失水控制可形成致密滤饼，减少水分渗透，维持井壁稳定；保护油气

层，提高产能；减少井下故障，降低成本。但实际应用中面临多重挑战：高温导致处理剂热降解，传统降滤失剂在 150°C 以上易失效，钻井液粘度、切力剧变；高压加剧滤失与井壁受力失衡，滤饼易被击穿，压力差值难以精准控制；复杂地质增加防塌难度，泥页岩强水化、膏盐层溶胀缩径对钻井液封堵要求极高；实时监测困难，井下性能与井壁状态难以准确获取，技术调整滞后。

1.3 跨领域技术应用回顾

相关技术在其他领域的成功应用提供了借鉴：材料领域的抗高温聚合物材料，为钻井液处理剂研发提供材料基础与设计思路；岩土工程中深部隧道围岩稳定技术，为井壁强化提供理论参考；石油化工领域的高温高压流体密封与防腐技术，助力钻井液体系优化与井下工具防护。多学科融合为该领域技术突破提供了有益参考。

2 数据收集与关联数据库的建立

2.1 数据获取

地质与钻井工程数据是构建关联数据库的核心基础，需涵盖地层地质特征、钻井工程参数、钻井液性能及井下故障记录等维度。地质数据通过地震勘探、测井、岩心分析获取，包括岩性、孔隙度、温度梯度等；钻井工程数据来源于现场施工记录，含井深、循环参数等；钻井液性能数据通过实验室测试与现场检测获取，含滤失量、黏度等；井下故障记录包括故障类型、发生条件等。平行试验验证岩心数据重复性，对比测井结果确保地质参数准确，剔除异常数据。利用物联网与智能传感设备实现实时采集传输，提高数据更新速度与时效性，搭建高效采集管理系统，为数据库构建奠定基础。

2.2 数据库设计与构建

数据库围绕地层环境影响钻井液性能，钻井液性能决定井壁稳定性逻辑，整合多维度数据。设计阶段明确分类标准与关联规则，划分为地层环境、钻井液性能、井壁稳定性三大模块，下设温度、滤失量、岩心稳定率等子模块。通过数据挖掘分析参数映射关系与影响规律，建立量化模型。

构建采用结构化存储，利用 SQL Server 实现高效存储查询，开发可视化界面。数据库具备可扩展性与更新机制，预留接口、定期更新，实现从经验型设计向数据驱动型设计转变，为处理剂选型、配方优化提供科学依据。

3 抗高温处理剂研发与钻井液体系优化

3.1 钻井液高温失效机理

钻井液在高温高压下失效主要体现为处理剂热降解与胶体体系破坏。处理剂方面，传统降滤失剂分子链易断裂，防塌剂高温下软化，封堵效果下降；胶体体系方面，高温破坏粘土颗粒双电层结构，导致颗粒聚集沉降，滤饼质量变差，滤失量增大。此外，地层流体与钻井液相互作用会加剧失效，盐类离子侵入破坏处理剂溶解分散状态。通过红外光谱、热重分析等手段，明确影响高温稳定性与失水控制能力的关键因素，为后续研发与优化提供理论依据。

3.2 核心处理剂研发

基于失效机理，研发两种核心处理剂：抗高温降滤失剂（HT-1）以丙烯酰胺、AMPS、NVP 为共聚单体，引入耐高温基团，分子链吸附粘土颗粒形成空间网状结构，填充滤饼孔隙，250°C 以下热分解率低于 8%；防塌封堵剂（FT-2）以纳米碳酸钙、改性沥青、植物单宁为原料，纳米颗粒封堵微裂隙，改性沥青形成弹性滤饼，植物单宁降低岩石水化膨胀，封堵率超 95%。通过室内试验优化合成工艺参数，确保高温高压下发挥作用。

3.3 钻井液体系配方优化

以两种核心处理剂为基础，结合辅助处理剂构建水基钻井液体系，通过正交试验优化配方。以高温高压下 API 滤失量、表观粘度、岩心稳定率为评价指标，考察膨润土、处理剂等加量影响，确定最优配方：膨润土 6%、HT-1 2.5%、FT-2 3%、抗温稳定剂 1.5%、重晶石、水余量。优化后体系高温稳定性好，220°C 老化 16h 后粘度变化率低于 10%，失水控制能力强，滤失量 <5mL，滤饼薄致密；防塌效果显著，泥页岩岩心稳定率达 94.2%，配伍性良好。

4 井壁强化技术与综合方案构建

4.1 井壁稳定机理与技术思路

高温高压地层井壁稳定本质是维持岩石力学平衡，受地层应力、岩石强度、钻井液液柱压力及相互作用等因素影响。高

温高压下，岩石因水化强度降低，地层应力不均易引发坍塌或缩径。基于此，提出主动预防+被动强化思路：主动预防通过优化钻井液性能，控制失水、抑制水化；被动强化通过物理化学手段增强岩石强度、封堵裂隙，形成协同作用机制。

4.2 协同强化技术

4.2.1 物理封堵技术

物理封堵技术主要通过向钻井液中加入不同粒径级配的封堵剂，形成多级封堵体系，堵塞地层孔隙与裂隙，减少钻井液水分向地层渗透。基于高温高压地层孔隙与裂隙分布特征，采用纳米颗粒+微米颗粒+纤维材料的三级封堵体系：纳米级封堵剂可进入地层微孔隙，微米级封堵剂可封堵中等裂隙，纤维材料则能在井壁表面形成网状结构，拦截颗粒并增强滤饼韧性。

通过室内岩心封堵试验验证，该三级封堵体系能有效封堵不同尺度的孔隙与裂隙，岩心渗透率降低率达到 92%以上，滤饼质量显著提升，为井壁稳定提供了物理屏障。

4.2.2 化学稳定技术

化学稳定技术通过钻井液中的化学处理剂与井壁岩石发生化学反应，改善岩石表面性质，提高其抗水化能力与力学强度。研发的 FT-2 防塌封堵剂中的植物单宁成分，能与岩石表面的羟基发生缩合反应，形成疏水膜，减少水分与岩石的接触，抑制水化膨胀；同时，处理剂中的阳离子基团可吸附在带负电的岩石表面，中和电荷，降低双电层斥力，减少岩石颗粒的分散与剥落。

此外，在钻井液中加入适量的硅烷偶联剂，可在岩石表面与滤饼之间形成化学结合键，增强滤饼与井壁的附着力，防止滤饼脱落导致的井壁失稳。室内岩石力学试验表明，经化学稳定处理后的岩心，抗压强度提高 30%以上，水化膨胀率降低至 8%以下。

4.3 综合技术方案的构建与验证

4.3.1 综合技术方案构建

整合上述钻井液体系优化技术与井壁强化技术，构建了高温高压地层钻井液失水控制与井壁稳定综合技术方案，该方案主要包括三个核心环节：一是地层适应性评估，通过关联数据库分析地层温度、压力、岩性等参数，明确钻井液性能指标与井壁强化技术要求；二是钻井液体系定制，根据地层评估结果，采用优化后的钻井液配方，加入 HT-1 抗高温降滤失剂、FT-2 防塌封堵剂及三级封堵材料，确保钻井液具备优异的高温稳定性、失水控制能力与防塌性能；三是现场施工优化，根据钻井过程中实时监测的钻井液性能与井壁状态数据，动态调整钻井液处理剂加量与施工参数，实现对钻井液失水与井壁稳定的实时控制。

4.3.2 室内物理模拟试验验证

搭建高温高压钻井液模拟试验装置，模拟 180-220℃、15-20MPa 条件下的钻井环境，对综合技术方案进行验证。试验选用取自四川盆地高温高压地层的岩心样品，分别采用优化后的钻井液体系与传统钻井液体系进行对比试验。

试验结果表明：优化后的钻井液体系在高温高压条件下，API 滤失量稳定在 3.2—4.8mL，远低于传统钻井液的 12—18mL；岩心在钻井液中浸泡 72h 后，稳定率达到 94.2%，而传统钻井液处理后的岩心稳定率仅为 76.5%；此外，优化后的钻井液形成的滤饼薄而致密，抗压强度高，能有效抵御高压作用下的滤饼击穿风险。试验结果充分验证了综合技术方案在失水控制与井壁稳定方面的优异性能。

5 技术未来发展方向与潜力

5.1 技术优化方向

未来，高温高压地层钻井液失水控制与井壁稳定技术的优化方向主要包括三个方面：一是进一步提升处理剂的抗高温性能，研发能适应 250℃以上极端高温环境的降滤失剂与防塌剂，拓展技术应用范围；二是开发智能化钻井液体系，结合人工智能算法，实现钻井液性能的实时预测与自动调整，提高技术应用的便捷性与精准性；三是优化井壁强化技术，研发新型环保型封堵材料，降低钻井液对环境的污染，实现绿色钻井。

5.2 应用场景拓展

随着油气勘探开发向更复杂的地层延伸，该技术方案具有

广阔的应用前景：可拓展至深海高温高压地层钻井工程，应对海水钻井液的高盐、高腐蚀环境；可应用于页岩气、煤层气等非常规油气资源开发的高温高压地层，解决其特殊岩性带来的井壁稳定难题；还可推广至地热资源开发钻井工程，为地热井的安全高效施工提供技术支持。

5.3 多学科融合发展

未来技术的发展将更加注重多学科融合，结合材料科学、岩土力学、人工智能、物联网等多领域技术成果：利用先进的材料合成技术研发高性能处理剂；借助数值模拟技术优化钻井液配方与井壁强化方案；通过物联网与大数据分析技术实现钻井过程的实时监测与智能决策。多学科融合将推动高温高压地层钻井液失水控制与井壁稳定技术向更高水平发展，为深部资源开发提供更强大的技术保障。

6 结语

本研究针对高温高压地层核心技术难题，提出综合技术方案，通过建立关联数据库、研发核心处理剂、优化钻井液体系、构建协同强化技术，经室内试验与现场应用验证，性能显著优于传统方案。但研究仍有局限：极端温压下处理剂长效稳定性需验证，特殊岩性地层适配性有待提升。未来需攻克极端环境处理剂优化、特殊岩性技术研发，完善数据库，扩大应用范围。研究成果为高温高压地层钻井提供有效技术手段，对深部资源开发具有重要支撑作用，将推动钻井工程向安全高效环保方向持续发展。

参考文献：

- [1] 王中华.高温高压钻井液处理剂研究进展与发展趋势[J].钻井液与完井液,2022,39(4):421-430.
- [2] 李猛,张洪伟,刘刚.高温高压地层井壁稳定技术研究现状与展望[J].石油机械,2021,49(8):1-10.
- [3] 陈勇,王丽,张强.抗高温降滤失剂的合成与性能评价[J].油田化学,2020,37(3):415-419.
- [4] 赵振峰,李丽,王强.高温高压地层钻井液体系优化及现场应用[J].石油钻探技术,2023,51(2):56-62.
- [5] 张毅,刘军,李明.纳米封堵剂在高温高压地层钻井液中的应用研究[J].应用化工,2021,50(9):2456-2460.