

# 高温高压深井水基钻井液流变性调控及经济价值评价

王贤亮 (中海油田服务股份有限公司天津分公司, 天津 300450)

**摘要:** 本文以中海油海上高温高压气藏钻井实践为背景, 注重水基钻井液黏度、切力及动塑比等重点流变性参数, 详细剖析高温降解、压力传递带来钻井液性能变化的机制。借助改良处理剂配伍、建立动态调控模型, 实现钻井液流变性的准确控制, 围绕安全保障、能力增进、成本节约及环保合规四个维度, 量化流变性调控技术的经济价值, 为深层油气资源高效开发给予技术支撑跟经济评价依据, 助力海上高温高压钻井工程提质增效。

**关键词:** 高温高压深井; 水基钻井液; 流变性调控; 经济价值

**中图分类号:** TE254      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0062-03

## Rheological regulation and economic value evaluation of high-temperature and high-pressure deep well water-based drilling fluids

Wang Xianliang (Tianjin Branch of China Oilfield Services Co., Ltd, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Based on the drilling practice of CNOOC's offshore high-temperature and high-pressure gas reservoirs, this paper focuses on key rheological parameters such as viscosity, shear force and dynamic plastic ratio of water-based drilling fluids, and analyzes in detail the mechanism of changes in drilling fluid performance caused by high-temperature degradation and pressure transmission. By improving the compatibility of treatment agents and establishing dynamic control models, the rheological properties of drilling fluids can be accurately controlled. Focusing on four dimensions: safety guarantee, capacity enhancement, cost savings, and environmental compliance, the economic value of rheological control technology can be quantified to provide technical support and economic evaluation basis for the efficient development of deep oil and gas resources, and to help improve the quality and efficiency of offshore high-temperature and high-pressure drilling projects.

**Key words:** High-temperature and high-pressure deep wells; Water-based drilling fluid; rheological property regulation; Economic value

全球油气资源勘探开发已逐步转向深层、超深层领域, 海上高温高压深井变成中海油增储上产的核心阵地, 这类井段地质条件繁复, 井底温度常超过 150℃, 压力系数多高于 1.8, 给钻井工程带来不少考验, 水基钻井液因环保性好、成本相对较低及维护便利等优势, 在海上钻井中得到广泛应用, 但其流变性在高温高压环境下易发生剧烈变化。黏度异常升高会增加循环阻力与泵压, 减少钻井能力; 切力衰减则可能致使岩屑悬浮能力不足, 引发井眼净化困难、卡钻等事故, 流变性失控已变成制约高温高压深井钻井周期、增进作业风险的关键因素之一, 目前, 中海油在渤海、南海等区域的高温高压井作业多次遭遇钻井液流变性突变, 致使非生产时间增加与作业成本上升。所以, 开展水基钻井液流变性调控技术研究, 明确经济价值, 助推海上深层油气资源高效开发, 增进企业重点竞争实力。

### 1 高温高压深井水基钻井液流变性调控的多元价值

#### 1.1 保障钻井安全降低事故风险

高温高压深井的井眼稳定跟钻井安全, 很大程度上依赖水基钻井液稳定的流变性, 高温作用下, 传统钻井液中的增黏剂、降滤失剂等处理剂容易热降解, 造成黏度骤降、切力丧失, 岩屑不能有效悬浮, 随钻

井液循环上返时容易在井眼环空堆积, 引发井眼缩径、卡钻等恶性事故。凭借准确调控流变性, 维持合理的动塑比与静切力, 可保证岩屑在停钻期间仍能保持悬浮状态, 避免沉降埋钻, 稳定的黏度有益于钻井液在环空形成均匀的泥饼, 减少滤失量, 减少地层水侵入对井壁的冲刷, 抑制页岩水化膨胀, 防止井壁坍塌。中海油在南海某高温高压气井作业时, 曾因钻井液流变性失控造成卡钻事故, 处理耗时 72h, 直接经济损失超千万元, 使用流变性调控技术后, 后续同类井段事故明显减少, 钻井作业安全更有保障, 避免了经济损失, 也保护了作业人员生命安全跟企业安全生产声誉。

#### 1.2 提升钻井效率缩减作业周期

钻井液流变性与钻井能力呈直接正相关, 合理的流变性参数可减少钻井时的能量损耗, 增强机械钻速, 高温高压环境下, 钻井液黏度偏高会增加钻柱内流动阻力, 致使泵压升高, 限制钻压跟转速加强, 减少机械钻速, 凭借流变性调控, 把钻井液黏度跟切力控制在最优范围, 可减少流动阻力, 让钻压与转速发挥更好效果, 明显增进破岩能力。同样, 稳定的流变性能保证岩屑快速带出井眼, 减少起下钻次数以及短起下

钻耗时，减少非生产时间，中海油渤海某高温高压井应用流变性调控技术后，机械钻速较邻井加强 35%，单井钻井周期缩短 12 天，大幅增强钻井作业能力，助力油气资源早日投产。

### 1.3 降低材料损耗控制作业成本

水基钻井液材料成本占钻井总费用比例很高，流变性失控会大幅增加处理剂消耗量，推高作业成本，钻井液因高温降解、流变性参数偏离设计范围时，需大量补充增黏剂、降滤失剂等处理剂恢复性能，不只抬高材料采购成本，还因频繁添加处理剂造成钻井液性能波动，形成恶性循环。凭借准确的流变性调控，可延缓处理剂的热降解速度，延长钻井液使用寿命，减少处理剂的补充量，稳定的流变性能减少钻井液的漏失风险，减少钻井液的总体消耗量，流变性调控还可减少钻具磨损，减少钻具更换频率，减少钻具损耗成本。中海油在某区块高温高压井群作业中，使用流变性调控技术后，单井钻井液材料成本平均减少 18%，钻具损耗成本减少 12%，成本控制效果明显，增强了钻井工程的经济效益。

### 1.4 适配环保要求降低合规成本

海上钻井作业环保要求严苛，水基钻井液排放需符合严格环保标准，流变性调控技术增进环保性能、减少合规成本作用突出，钻井液流变性不好，容易漏失，污染地层与海水环境，企业要付高额治理费用以及罚款，靠着流变性调控，减少漏失，从源头控制污染风险。同样，调控流变性时可改良钻井液配方，选用环保型处理剂，增强钻井液生物降解性，减少污染物含量，这一类改良不光符合海上环保法规要求，又减少钻井液处理跟回收成本。

## 2 高温高压深井水基钻井液流变性调控应用现状

### 2.1 增黏剂应用趋于成熟但适配性待提升

增黏剂是调控水基钻井液流变性的重点处理剂，性能直接决定钻井液高温高压下的黏度与切力稳定性，中海油高温高压深井作业已广泛应用生物聚合物、合成聚合物等类型增黏剂，生物聚合物类增黏剂如黄原胶，中低温环境下增黏效果显著，且抗盐性良好，温度超过 140℃ 时容易热氧化降解，增黏性能迅速减弱，比较难满足深层钻井需求。合成聚合物类增黏剂如丙烯酰胺类共聚物，靠着分子结构设计增加热稳定性，能承受 180℃ 以上高温，在南海部分高温高压井应用效果良好，不过，此类增黏剂遇到高盐高钙镁离子地层，容易交联团聚，造成钻井液黏度异常升高，流变性稳定性变差。目前增黏剂应用已有较成熟的选型体系，但匹配不同地质条件跟温度压力区间还不够准确，需要继续改良。

### 2.2 降滤失技术普及但长效性不足

降滤失性能与流变性周密相关，优质滤饼可减少滤失量，同样维持钻井液体系稳定，中海油目前在高温高压钻井中，使用褐煤树脂、磺化酚醛树脂等降滤失剂，靠着吸附跟封堵作用形成致密滤饼，减少滤失量，这类降滤失剂在高温下有着一定稳定性，可满足 160℃ 左右井段的需求。实际应用时，钻井深度加大，井底压力上升，滤饼容易被压实，造成滤失量回升，需多次添加降滤失剂来保持性能，遇到含酸性气体的井段，降滤失剂容易发生化学降解，丧失封堵能力，不但改变流变性，还可能带来井壁稳定问题。降滤失技术已在多数高温高压井中使用，但在长效性和繁复工况适应性上还有不足，难满足超深层、长裸眼井段的钻井需求。

### 2.3 流变性检测手段多元但实时性欠缺

准确检测是调控流变性的基础，目前中海油已建成种类较多的流变性检测体系，含有室内实验检测和现场检测两类，室内实验用高温高压流变仪，模拟井底温压条件，提前测试钻井液流变性并改良配方；现场用便携式流变仪，定期测循环罐内钻井液的黏度、切力等参数。这一些检测手段为流变性调控提供数据支撑，但实时性明显不足，现场检测一般每隔 1-2h 实行一次，不容易及时捕捉钻井液流变性的动态变化，尤其在钻遇繁复地层或井底温度压力突然改变时，容易出现检测延迟，造成调控不及时。部分海上平台虽引入在线检测设备，但因海水颠簸、现场振动等原因，检测精度不足，数据可靠性不够，比较难满足实时准确调控的需求。

### 2.4 环保型体系研发加速但成本偏高

响应海上环保政策要求，中海油加快研发环保型水基钻井液体系，这类体系流变性调控有新特点，环保型体系多用可生物降解的天然高分子处理剂，改良配伍让流变性稳定，同样减少污染物排放，目前，已在渤海部分环保敏感区域的高温高压井中试点应用，流变性指标基本满足钻井需求，生物毒性明显下降，达到环保排放标准。环保型处理剂研发与生产工艺冗杂，原材料成本偏高，使得环保型钻井液体系整体成本比传统体系高出 20%-30%，部分环保处理剂在高温下稳定性不够，需搭配专用稳定剂，进一步增加体系成本跟调控难度，环保型流变性调控体系虽发展前景广阔，但成本问题变成制约其大规模推广应用的关键因素。

## 3 高温高压深井水基钻井液流变性精准优化策略

### 3.1 靶向设计高温稳定型增黏剂

针对现有增黏剂在高温高压环境下稳定性不足的问题，依据分子结构设计理论，开展靶向性增黏剂研

发, 凭借引入刚性基团与耐热官能团, 增强分子链的热稳定性, 譬如在丙烯酰胺聚合物分子中引入芳环跟磺酸基团, 形成立体网状结构, 增强抗热降解能力。实验室测试表明, 这类改性增黏剂在 200℃ 高温下依旧能保持 85% 以上的增黏性能, 比传统产品增加 40%, 融合不同区块的地质特征, 建立增黏剂选型数据库, 依照地层温度、盐度跟压力参数, 匹配最合适的增黏剂类型与加量。南海某 210℃ 高温高压井使用靶向设计的磺化芳环丙烯酰胺共聚物增黏剂, 钻井液黏度波动幅度控制在 10% 以内, 岩屑悬浮效果良好, 未出现沉降问题, 同样的, 使用复合增黏技术, 把改性聚合物跟纳米硅溶胶复配, 靠着纳米颗粒的填充作用增强分子间作用力, 更深一步加强流变性稳定性, 高盐地层里有效避免增黏剂团聚现象, 保证钻井液性能稳定。

### 3.2 构建长效协同降滤失体系

解决降滤失剂长效性不足的问题, 建立“封堵-吸附-稳定”三位一体的协同降滤失体系, 实现流变性与降滤失性能同步稳定, 选用纳米碳酸钙跟磺化沥青复配做主封堵剂, 纳米碳酸钙填充微小孔隙, 磺化沥青在井壁形成韧性滤饼, 两者配合加强封堵效果, 减少滤失量。搭配两性离子聚合物降滤失剂, 分子链上的极性基团可吸附于黏土颗粒表面, 形成稳定的胶体体系, 延缓滤饼压实速度, 室内实验确定各组分最优配比, 180℃、20MPa 条件下, 钻井液滤失量控制在 5mL 以内, 72h 高温老化后滤失量无明显反弹。渤海某长裸眼高温高压井使用该体系, 裸眼段长度达 1200m, 钻井时滤失量一直较低, 井壁稳定, 没有漏失事故, 流变性参数稳定, 降滤失剂补充次数减少 60%, 作业成本下降。

### 3.3 研发实时动态流变性监测系统

依赖物联网跟传感器技术, 研发适用于海上高温高压钻井的实时动态流变性监测系统, 解决传统检测实时性与精度不够的问题, 系统由井下传感器、数据传输模块与地面监控平台三部分组成, 井下传感器使用耐高温高压设计, 可耐受 220℃ 高温跟 30MPa 压力, 直接装在钻柱底部, 实时采集钻井液的黏度、切力、温度、压力等参数, 采样频率加强至每秒 1 次。数据传输模块凭借无线通信配合钻柱脉冲传输, 把井下数据快速传到地面监控平台, 传输延迟控制在 10s 以内, 地面监控平台搭载智能分析算法, 处理实时数据, 绘制流变性参数变化曲线, 参数偏离预设范围时, 系统自动发出预警, 配合地层数据给出调控建议。南海某高温高压井试用期间, 该系统成功捕捉三次流变性突变, 提前预警, 技术人员及时改变处理剂加量, 防止

事故发生, 系统还能跟钻井液自动添加装置联动, 完成流变性的自动调控, 增加调控能力跟精度。

### 3.4 优化环保型体系配方控制成本

针对环保型钻井液体系成本偏高的问题, 借助原材料选型、配方改良与循环利用三个方向入手, 达成环保与经济的平衡, 原材料方面, 选用来源大量的天然植物胶替代部分合成环保处理剂, 譬如改性淀粉跟纤维素复配用作增黏组分, 成本比合成聚合物减少 30%, 生物降解率超过 90%。配方改良时用响应面法安排实验, 顾及流变性指标以及成本, 找出各成分最佳配比, 在保证流变合格的基础上, 少用高价环保处理剂, 钻井液循环利用靠固控设备清除岩屑和杂质, 再加少量处理剂就能再次使用, 回收率超八成五。渤海某环保敏感区域的高温高压井使用改良后的环保型流变性调控体系, 单井钻井液成本比传统环保体系减少 25%, 流变性参数稳定, 环保检测全部达标, 同样, 开展环保处理剂回收技术研究, 提取废弃钻井液中的有效成分再利用, 更深一步减少材料成本, 助推环保型体系的大规模应用。

## 4 结语

高温高压深井水基钻井液流变性调控是保障钻井安全、增强作业能力的核心技术, 经济价值与工程价值于中海油深层油气开发实践中获得充分验证, 本文提出靶向设计高温稳定型增黏剂、建立长效协同降滤失体系、研发实时动态监测系统及改良环保配方控制成本的改良方案, 研究成果已在海上多个高温高压井中得到应用验证, 明显加强钻井工程的安全性跟经济性, 助推海上油气资源开发实现更高效率、更低花费、更加环保。

### 参考文献:

- [1] 唐自恒. 石油深井水基钻井液性能控制因素及应用实践研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(11): 303-305.
- [2] 李书应, 孙钢. 页岩气井水基钻井液用环保型抑制剂的制备及性能研究 [J]. 断块油气田, 2025, 32(02): 346-352.
- [3] 王洪杰. 石油深井水基钻井液性能控制因素研究及应用 [J]. 石化技术, 2024, 31(12): 179-181.
- [4] 陈超. 深井气侵井筒多相流动模型与控制方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2024.
- [5] 易鹏昌, 张立权, 李强, 等. 涠洲 11-1 油田调整井水基钻井液优选与应用 [J]. 化工管理, 2024(02): 152-155.

### 作者简介:

王贤亮 (1990.08—), 男, 汉族, 内蒙古乌兰察布人, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 钻完井工程及钻井液工艺优化。