

# Optimization and Field Application of High-Temperature High-Pressure (HPHT) Well Drilling and Completion Fluid Systems

Shiqiang Guo

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling General Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

## Abstract

As oil and gas exploration and development increasingly penetrate deep and complex geological formations, HPHT wells have become more prevalent. This trend imposes higher requirements on drilling and completion fluids, which must demonstrate excellent thermal stability, strong rheological properties, high temperature and pressure resistance, effective anti-collapse performance, and reservoir protection capabilities. Additionally, cost factors must be considered alongside optimal lubrication and anti-sticking performance while maintaining environmental control. This paper investigates water-based, oil-based, and synthetic-based drilling fluid systems suitable for HPHT wells, proposing a selection principle prioritizing thermal stability and sealing performance. Through optimized formulation design and field application control, the study aims to achieve wellbore stability, lubrication, anti-sticking, and reservoir protection under high-temperature and high-pressure conditions, ultimately providing a rational optimization solution for drilling and completion fluids.

## Keywords

high temperature and high pressure; drilling and completion fluid; system optimization; stability

## 高温高压井钻井完井液体系优选与现场应用

郭世强

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710200

## 摘要

由于油气勘探开发逐步向深部复杂地层迈进, 高温高压(HPHT)井越来越普遍, 对钻井完井液提出了更高的要求, 需要满足热稳定性好、流变性能强、抗温耐压高、防塌能力强、储层保护好等各项功能, 并且要在润滑防卡性能良好以及环保可控性的前提下兼顾成本因素。本文针对高温高压井钻井完井液的各项功能需要, 探讨了适合HPHT井的水基、油基和合成基钻井液体系, 并且提出以热稳定、封堵性为主导的优选原则。通过对配方的设计优化与现场应用把控来实现高温高压条件下井壁稳定、润滑防卡、储层保护的目 的, 以期得到合理的钻井完井液优选方案。

## 关键词

高温高压; 钻井完井液; 体系优选; 稳定性

## 1 引言

受全球能源日益增长的需求驱动, 油气勘探开发向更深层、更复杂区域发展, 高温高压(HPHT)井数量快速增多, 常温井技术无法适应此类高温高压井的钻井完井工作, 由此给钻井完井液赋予了更高的性能要求。钻井完井液是一种存在于钻井过程中流经钻柱和井眼间的钻井工程“血液”, 除了具有携砂、压稳地层和冷却、润滑钻具等功能外, 还应具有良好的热稳定性、抑制性、封堵性和储层保护能力, 否则极易造成井壁不稳定、钻具被腐蚀及储层损害等问题, 影响

钻井施工时效, 增加钻井成本。目前关于高温高压井钻井完井液体系优选的相关研究还未形成系统的理论知识或技术文件, 为更好地解决高温高压井钻井完井液问题, 针对上述主要钻井工程方面的技术难题, 在确定高温高压井钻井完井液系统技术要求的前提下, 详细分析了各种钻井液的性能特点, 按照热稳定性好、环保型好、经济效益高的原则优选了钻井完井液, 并对现场应用技术措施进行了分析和探讨, 期望为高温高压井安全高效作业提供参考依据和技术指导。

## 2 高温高压井对钻井完井液的技术要求

工作于高温高压井的钻井完井液应能在极其恶劣的环境中保持性能的稳定发挥, 热稳定性、流变性能、抑制性、封堵性和储层保护性是其最主要的技术指标。

【作者简介】郭世强(1980-), 男, 中国甘肃会宁人, 本科, 工程师, 从事钻井工程研究。

## 2.1 热稳定性

热稳定性是高温高压井钻井完井液最需要注意的问题,在高温( $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,钻井液处理剂容易发生降解、交联或失效,致使液相粘度降低、固相沉降或胶体结构遭到破坏,如一部分聚合物处理剂的聚合物大分子链在高温下发生断裂,导致其不能起到增粘携屑的作用;部分膨润土等黏土颗粒,在高温下会形成团聚,使体系的流变性能失控。为了保持钻井液完井液具有较高的热稳定性,在钻井液加入高温处理剂:主要是各种磺化类聚合物和合成高分子材料,在高温长时间作用下仍然能够维持稳定的胶体结构。

## 2.2 流变性能

热稳定性是高温高压井钻井完井液最需要注意的问题,在高温( $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,钻井液处理剂容易发生降解、交联或失效,致使液相粘度降低、固相沉降或胶体结构遭到破坏,如一部分聚合物处理剂的聚合物大分子链在高温下发生断裂,导致其不能起到增粘携屑的作用;部分膨润土等黏土颗粒,在高温下会形成团聚,使体系的流变性能失控。为了保持钻井液完井液具有较高的热稳定性,在钻井液加入高温处理剂:主要是各种磺化类聚合物和合成高分子材料,在高温长时间作用下仍然能够维持稳定的胶体结构。

## 2.3 抑制性

抑制性是钻井完井液能够抑制地层水化膨胀、分散性能的能力,高温高压井容易钻遇泥页岩、盐膏层等易水化的地层,若钻井液的抑制性不好,则会造成井径扩大、缩径或者卡钻的情况发生,而加入钾盐、铵盐等无机抑制剂或聚醚胺、聚丙烯酰胺等有机抑制剂都可以有效的减小地层的水化压力,使得井壁更加稳定。

## 2.4 封堵性与储层保护能力

封堵性和储层保护是相互联系的,由于高温高压储层中往往发育有大量的微裂缝和孔隙,若钻井液中的固相颗粒或者滤液侵入有可能造成大量的损害,影响储层的渗透率,所以钻井完井液需要具有良好的封堵性能,通过控制不同粒径范围内的颗粒成分来改善钻井完井液的颗粒尺寸分布,将刚性颗粒、弹性颗粒以及柔性颗粒复合封堵,提高井壁面滤饼质量,并减少滤液侵入,同时还要使钻井液体系与储层流体相匹配,避免产生结垢及乳化等问题。此外,随着环保意识的不断增强,钻井完井液还需要做到环保型,在诸如海洋等生态敏感区,则要求低毒及可生物降解等特性。

# 3 钻井完井液体系类型及其适应性分析

## 3.1 水体系

水基钻井液以水作为连续相,具有成本低廉、配制工艺简单、环保等优点,但是由于自身存在缺陷,使得水基钻井液无法满足高温高压下使用的要求。为提高水基钻井液在高温高压下性能稳定性和封堵性,可加入耐高温聚合物(如:磺化聚丙烯酰胺、聚乙烯醇)和封堵剂(如:纳米二氧化硅、

沥青等),但是由于水基钻井液易于监测与维护的特点,使其适用于浅水等地区使用。高密度( $< 2.0\text{ g/cm}^3$ )时水基钻井液流变性能难以调整,很难抑制盐膏层。

## 3.2 油体系

油基钻井液是利用柴油或者矿物油作连续相,它具备了良好的热稳定性(耐温 $> 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、润滑性及抑制性特点,同时油基钻井液连续相为油相,可以避免地层水化作用,十分适合强水敏性地层使用,而且油基钻井液高温高压下的滤失量比较低,能很好地保护储层,但是其成本很高,还有污染环境的风险,尤其是海上作业时,油基钻屑难以处理和排放。

## 3.3 合成烃类体系

合成基钻井液以合成烃类(如烯烃、酯类)为连续相,兼具油基钻井液的性能优势和水基钻井液的环保特性。合成基液生物降解性好,毒性低,且具有较高的闪点和较低的凝点,安全性更佳。在高温高压条件下,合成基钻井液能保持良好的流变性能和润滑性,但其成本高于水基钻井液,且对处理剂的选择性较强。

从表中可见,油基钻井液在热稳定性和抑制性方面表现最优,但环保性差;水基钻井液成本低、环保性好,但高温适应性有限;合成基钻井液在性能与环保之间取得了较好平衡,但成本较高。在实际应用中,需根据井深、温度、压力及地层特性进行综合优选。

# 4 钻井完井液体系优选原则与方法

## 4.1 热稳定性优先原则

高温高压井钻井完井液优选首先要坚持热稳定性的原则。高温会引起钻井液体系中各类处理剂发生不同程度的热降解、交联或水解反应而破坏钻井液的性能;高温还会影响钻井液的流变性能、滤失造壁性和润滑性能等,从而对钻井作业安全性造成严重影响。具体操作时要建立热稳定性的评价体系,需要对钻井液在目标温度下的老化情况进行全面的评价,例如可以采用将钻井液放在模拟井下温度条件下的设备内进行长时间热滚动试验,并且测定钻井液的流变参数变化、钻井液高温高压滤失量是否稳定和钻井液在高温条件下的沉降稳定性等等。如井底温度大于等于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深井选择油基或合成基钻井液体系,因为这类钻井液体系连续相为油相,具有较好的热稳定性和较高的热稳定性,在加入一定量的高温稳定剂(例如酚醛树脂、磺化沥青)后,可有效提高体系的热稳定性。

## 4.2 地层适应性原则

地层适应性是钻井完井液优选的准则之一,是指钻井完井液体系应该与所钻地层岩石力学特性、矿物学特征、地质环境等各项参数相吻合。地层适应性设计是在岩石力学、矿物学、地球化学、油藏工程等理论指导下,依据上述原理形成的对所钻地层建立起的一整套科学合理的地层适应

性评价体系,在泥页岩地层钻井中突出重点是抑制性控制。由于泥页岩地层中主要含伊利石、蒙脱石等水敏矿物,极易因水敏作用发生明显体积膨胀和强度衰弱等问题,所以应从多角度建立相应的抑制性保障体系,主要包含:第一,采用XRD和SEM等手段分析泥页岩地层矿物组成情况并确定其中的主要水敏矿物及其含量;第二,以阳离子交换容量检测数据为基础调整钾盐掺量,并根据电位曲线形态调节适当的 $K^+$ 浓度(一般为30000~45000 mg/L)利用钾离子特有的晶格固定效应抑制黏土水化;第三,通过页岩滚动回收率试验和线性膨胀试验来验证抑制效果,并且要求试验过程16小时热滚动后的页岩滚动回收率 $\geq 85\%$ ,线性膨胀率降低大于60%;强水敏性泥页岩地层油基钻井液体系一般具有较好的适用性,钻井液体系主要是利用油基钻井液体系油相连续相的特点将水体与地层完全隔离开,再添加适量的乳化剂和润湿剂使整个钻井液体系更加稳定可靠。

#### 4.3 储层保护原则

实行储层保护原则时要以建立完善的系统性伤害机理分析及防护体系为基础,通过钻井完井液—储层岩石—液流三者之间的平衡关系来达到。储层保护原则具体来讲可以分为储层特征识别、伤害机理分析、防护措施优化以及防护效果评价4个方面,针对其构建一套完整的储层保护技术。固相控制是储层保护的关键,建立基于储层孔隙结构特点的固相粒径控制标准,首先通过高压压汞实验和恒速压汞试验得到储层孔隙分布状况并得出主要流动通道喉道直径范围,然后采用1/3-1/7架桥规则调整固相颗粒级配,使架桥颗粒粒径控制在喉道平均直径1/3-1/2之间、填充颗粒粒径为架桥颗粒粒径的1/4-1/3之间;最后使用激光粒度分析仪动态观测固相粒径分布情况,保证D90小于地层最小喉道直径,从而防止杂质堵塞储层微孔喉道。

### 5 现场应用关键技术措施

#### 5.1 配置与维护是保障钻井液性能稳定的基础

现场根据所给配方中比例将处理剂全部加入到体系当中,并将它们充分搅拌混合均匀;在钻井过程中应该加入足够的处理剂来保证钻井液各项参数保持在较理想的范围内,如:油基钻井液的乳化剂含量、电稳定性需要常控,防止发生高温乳化失效;水基钻井液要控制固相含量、pH值,防止发生高温增稠或减稠等现象。

#### 5.2 性能监测是及时发现和解决问题的关键

现场必须备有高温高压流变仪、滤失仪等仪器设备,随时测得钻井液流变参数、滤失量及泥饼质量;采用钻井液录井技术,测得返出岩屑及滤液组分,判断地层变化情况及钻井液是否适宜,发现性能异常时应及时调整处理剂加入量或者补充处理剂。

#### 5.3 风险防控重点针对井壁稳定、钻具腐蚀及储层伤害

通过合理优化钻井液密度、保持井筒压力平衡状态、控制井涌或井漏;向钻井液中加入缓蚀剂、除氧剂等,减小钻具在高温高压下的腐蚀速度;使用可酸溶或油溶暂堵剂,降低储层损害程度。同时还需要做好应急措施,在井下遇到异常高温时应及时向井内注入冷却液或切换为备用钻井液系统。同时也要做好环保方面的考虑,比如如果是油基或者合成基钻井液时要配套钻屑回收装置,做到钻屑清理、回收、达标排放;如果是水基钻井液的话,要选着无毒的处理剂。

### 6 结论

高温高压井钻井完井液体系优选与现场应用是综合性问题,需从掌握体系性能、熟悉地层情况、了解现场施工环境等角度入手,本文主要通过分析高温高压井对钻井完井液的热稳定、抑制、封堵、环保的要求,对水基、油基和合成基钻井液的适用情况进行比较,并且从热稳定性的基础上结合地层适应性、储层保护、成本等方面分析了优选的准则;现场使用时要保证高温高压钻井液体系各环节的质量、保证高温高压钻井液体系性能,加强配置维护、加强性能检测和风险控制,在高温高压井钻井过程中保证钻井液体系性能稳定、安全高效;对于高温高压井的数量不断增加来说,钻井完井液技术还需不断革新和完善,研发新的高温处理剂以及将纳米堵漏技术和智能监测系统带入高温高压井中,来提高高温高压井钻井作业的成功率以及经济性。

#### 参考文献

- [1] 孙华.关于海洋深水钻井完井液关键技术的几点思考[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):189-191.
- [2] 高温高压超深水平井钻井完井液技术.四川省,四川仁智油田技术服务股份有限公司,2012-12-01.
- [3] 王瑞,但春阳,张佳斌.海洋深水钻井完井液关键技术研究[J].石化技术,2024,31(02):86-88.