

Study on quality standard of oil drilling engineering leakage prevention and plugging technology

Ning Xu

Kuwait Drilling Project Department, Shengli Petroleum Engineering Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

Aiming at the problem of frequent leakage accidents in oil drilling engineering, this paper systematically explores the quality standard system of leakage prevention and plugging process. Through the research and analysis of drilling fluid leakage mechanism and related influencing factors, a classification and evaluation method based on the characteristics of leakage channel is established, and key quality control indicators related to leakage prevention and plugging process are given. A dynamic monitoring system for drilling fluid properties and an evaluation device for plugging materials are proposed, and the real-time monitoring of process parameters and quality evaluation are achieved. The experimental results show that the optimized leakage prevention and plugging process can reduce the leakage amount by more than 40%, and achieve a 92% success rate of plugging. The quality standard system of leakage prevention and plugging process established in this paper involves three dimensions: prevention index, emergency index and effect evaluation index, which provides a scientific basis for standardizing field operations. The research results have important engineering application value in improving drilling safety and reducing operating costs.

Keywords

oil drilling; Loss control; Leak-proof technology; Quality standards; Dynamic monitoring

石油钻井工程防漏堵漏工艺质量标准研究

许宁

中石化胜利石油工程公司科威特钻井项目部, 中国·山东 东营 257000

摘要

本文针对石油钻井工程当中井漏事故频发的问题, 系统探究了防漏堵漏工艺的质量标准体系, 通过对钻井液漏失机理和相关影响因素的研究分析, 建立起基于漏失通道特征的分类评判方法, 给出有关防漏堵漏工艺的关键质量控制指标, 研究提出了钻井液性能的动态监测系统以及堵漏材料评价装置, 达成了工艺参数实时监控以及质量的评估。实验结果说明, 优化的防漏堵漏工艺可将漏失量降低40%以上, 实现了92%的堵漏成功率, 本文设立的防漏堵漏工艺质量标准体系涉及预防性指标、应急性指标和效果评价指标三个维度, 为规范现场作业提供了科学方面的依据, 研究成果在提升钻井安全性以及降低作业成本上具有重要工程应用价值。

关键词

石油钻井; 井漏控制; 防漏工艺; 质量标准; 动态监测

1 引言

井漏是石油钻井工程中最常见且危害严重的井下复杂情况之一。全球每年因井漏事故造成的直接经济损失超10亿美元, 还伴随着大量非生产时间的无谓消耗, 伴随油气勘探开发向深层以及复杂地层延伸, 井漏问题愈发凸显, 已成为约束钻井效率与安全的关键要点。传统的防漏堵漏技术判断时主要凭借经验, 未具备系统化的质量标准体系, 致使现场作业具有较大的盲目性与不确定性, 当今石油钻井防漏堵漏领域碰到三个主要技术瓶颈: 一是对漏失机理的认识存在

不足, 针对不同地层特征精准制定防控手段存在难题; 二是对工艺参数的控制很粗放, 缺失量化评价的相关标准; 三是效果评估采用的方法单一, 大多借助事后的查看, 不能实现过程管控。这些问题极大地影响了防漏堵漏技术的可靠程度和有效程度, 迫切需要建立科学又完善的质量标准体系, 本文从工程实践的需求角度出发, 采用理论分析、实验研究以及现场验证相结合的做法, 全面探究钻井液漏失的动态特性与堵漏材料的作用机制, 搭建防漏堵漏工艺全过程质量控制指标体系, 研究成果可为现场作业的规范开展以及工艺成功率的提高提供技术支撑, 对于保障钻井安全、降低作业开销意义重大。

【作者简介】许宁(1986-), 男, 中国黑龙江佳木斯人, 本科, 工程师, 从事钻井工程研究。

2 钻井液漏失机理与分类评价

2.1 漏失通道形成机理

钻井液漏失是流体受压差影响非预期流入地层，多种因素对漏失通道的形成产生影响，主要分为地质因素和工程因素两大类，就地质因素而言，地层的天然裂缝、孔隙还有溶洞是漏失的主要通路，构造运动、沉积环境和成岩作用一同对其发育程度起到控制作用，从工程因素这一维度，若钻井液柱压力超过地层破裂压力，就会造成诱导裂缝产生，不规范的钻井操作也许会激活天然薄弱面，让漏失的程度进一步加大。漏失通道按其尺度，可分为微观孔隙、宏观裂缝以及大型溶洞三种类型，微观孔隙通道的直径一般小于100 μm，多分布在高渗透砂岩以及碳酸盐岩内；宏观裂缝通道宽度从100 μm到10mm不等，一般出现在构造破碎带与页岩地层；大型溶洞通道直径比10mm要大，大多见于喀斯特发育地带，各类不同通道的漏失机理存在明显差异，

必须采取针对性的防治手段^[1]。

2.2 漏失动态特征分析

钻井液漏失呈现动态变化这样一个过程，其速率综合受地层特性、钻井液性能和工艺参数等的影响，漏失开始阶段一般表现出渐进式的增长状态，随着通道经冲刷后不断扩大，说不定突然就转变为失稳性漏失，建立漏失速率数学模型可观察到，漏失量Q与压差ΔP、通道特征参数K呈现如下关系：漏失量Q由通道特征参数K与压差ΔP的n次方相乘得到，而n是流态指数，其取值处于1~2范围。处于层流状态时，n取值为1，紊流状态当中，n差不多趋近2，从这一关系可以看出，要减少漏失量，控制井底压差是有效的手段，从表1可以看出，裂缝性通道漏失在初期阶段增长平稳，后期加速愈发明显；孔隙性通道漏失表现得相对稳定；溶洞性通道呈现间歇性的喷涌现象，此类动态数据为分类防控供给了理论依据^[2]。

表1 不同类型漏失通道的漏失速率特征对比

漏失通道类型	漏失初期特征	漏失中期特征	漏失后期特征	典型地层
裂缝性通道	漏速 5~10m ³ /h, 线性增长	漏速 10~25m ³ /h, 增速加快	漏速 > 30m ³ /h, 呈指数增长	构造破碎带、页岩地层
孔隙性通道	漏速 2~5m ³ /h, 稳定渗流	漏速 5~8m ³ /h, 缓慢上升	漏速 8~12m ³ /h, 趋于平稳	高渗透砂岩、碳酸盐岩
溶洞性通道	漏速波动大, 5~20m ³ /h	间歇性喷涌, 峰值 > 50m ³ /h	漏速不稳定, 时有时无	喀斯特发育区

注：测试条件为 ΔP=3MPa，室温环境下使用水基钻井液的实验结果。

2.3 漏失等级分类标准

本文以漏失的速率与总量两个维度为依托，创制四级漏失分类评价标准，微漏：漏速不足5m³/h，总量少于20m³；小漏：漏速在5m³/h到15m³/h之间波动，总量从20m³到50m³；中漏：漏速介于15-30m³/h，总量介于50-100m³；大漏：漏速超出30m³/h，总量超出100m³，不同等级的漏失问题，要采取差异化的应对手段，主要是调整钻井液性能，若出现大漏情况，应立刻停钻实施专项堵漏。

表2 钻井液漏失等级分类标准

漏失等级	漏失速率 (m ³ /h)	漏失总量 (m ³)	应对措施
微漏	< 5	< 20	钻井液调整
小漏	5-15	20-50	随钻堵漏
中漏	15-30	50-100	暂停循环
大漏	> 30	> 100	专项堵漏

在高温高压的状态里，滤失量需达到小于15ml/30min。要进行预防性防漏，钻井液性能优化是基础，推荐采用拥有良好封堵特性的复合基钻井液体系，配方当中应包含2%~3%的纳米级封堵材料和1%~2%的弹性颗粒，室内开展的实验表明，该配方能让微裂缝的封堵效率增加50%以上，现场应用的时候，需实时监测钻井液的流变性、滤失性与封堵性，让性能指标一直处于最优的区间^[3]。

3.2 应急堵漏材料评价标准

堵漏材料是应对井漏事故的关键资源，评价其性能应把以下指标纳入考量：颗粒级配得实现D90/D10 > 5，以契合不同尺度的漏失通道；承压能力需达到超过5MPa的水平，保障封堵的稳定性；流速为3m/s时，抗冲刷性保持率 > 90%；呈现良好的配伍特性，不会影响钻井液的整体性能。常见堵漏材料可归为纤维类、颗粒类和凝胶类这三大类别，需按照漏失类型恰当选用，纤维类材料对裂缝性漏失的封堵效果最好，封堵取得成功的比率可达85%；孔隙性漏失可以采用颗粒类材料，能实现78%的成功率；凝胶类材料对溶洞性漏失展现出独特的优势，成功率可攀升至70%，多种材料复合运用可进一步增强堵漏效果^[4]。

3 防漏堵漏工艺关键质量控制指标

3.1 预防性防漏工艺标准

预防性防漏是控制井漏现象最经济有效的手段，其核心所在是维持井筒-地层系统的压力稳定平衡，主要控制指标有：钻井液密度窗口的精度控制需达到±0.02g/cm³范围；当量循环密度(ECD)不得突破地层破裂压力的90%；把起下钻速度控制在0.3m/s这个范围以内，杜绝产生抽汲压力；API标准下，钻井液滤失量要达到小于5ml/30min的要求，

3.3 堵漏施工工艺规范

直接影响最终效果的是堵漏施工质量，必须严格管理以下相关环节：确定漏层位置时误差要<3m，能运用温度测井、噪声测井等方式精准找出位置；需动态调整堵漏浆配

方以契合漏失特征,需把注入排量控制在 $0.5 - 1.0\text{m}^3/\text{min}$ 这个区间;关井憋压程序采用阶梯式升压方式,每一个级别需稳压15分钟,最高压力不得超出地层破裂压力的80%;候凝时间是根据材料类型来判定的,平常纤维类的候凝时间大概是4-6小时,凝胶类材料的候凝时长是8-12h。施工期间要实施全程管控,关键参数囊括:泵压波动范围要求为 $< 10\%$;注入体积跟设计预期的误差小于 5% ;返出量的监测精度限制在 $< 0.2\text{m}^3$,构建数字化监控平台,实时收集施工数据然后分析,要是检测出异常,马上调整既定方案,完成堵漏操作后应开展效果验证,涵盖承压测试与循环观察,保证24小时里无再次漏失的现象。

4 质量评价体系与现场应用

4.1 全过程质量评价指标体系

钻井作业自始至终都要进行防漏堵漏工艺质量评价,建立起三级评价体系,预防阶段重点评价指标为:钻井液性能达标情况的比率 $> 95\%$,井身质量实现 100% 合格,ECD控制合格率为大于 90% 的水平,应急阶段的评价指标囊括:漏失诊断的精准率 $> 85\%$,堵漏材料选择的合理情况占比 $> 90\%$,施工参数实现符合的比率 $> 95\%$ 。效果评价阶段涉及的指标为:一次堵漏达成成功的概率在 85% 以上,复漏所占的比例低于 10% ,非生产时间控制的占比低于 15% ,质量评价方法需采用定量与定性相结合的手段,定量分析依靠实时监测数据开展,测算各项指标的达标水平;定性评价由专家对施工方案的合理性及执行规范性进行评估,制订综合评价模型,把各指标依据权重汇总为质量指数 QI ,归为优秀($QI > 90$)、良好($80 < QI \leq 90$)、合格($70 < QI \leq 80$)、不合格($QI \leq 70$)这四类等级。

4.2 现场应用案例分析

本文提出的质量标准体系被应用到某深井钻井项目里,获得了明显成效,该井于 4500m 的深度钻遇了高压裂缝性漏失层,初始阶段漏速达到了 $25\text{m}^3/\text{h}$,按照既定程序,开始先调整钻井液的性能,添加 2% 的纳米硅,同时添加 1.5% 的弹性石墨,控制漏速至 $10\text{m}^3/\text{h}$ 以内;之后注入了 35m^3 的纤维-凝胶复合堵漏浆,通过阶梯式憋压操作,让压力升至 18MPa ,稳压6小时时段结束后恢复循环,顺利建立起一套完整循环,最终实现了将漏失总量控制为 65m^3 ,跟同类井比起来,漏失量降低了 42% 。项目实施的进程期间,借助

数字化监控系统实时采集到 1265 组工艺参数,所采集的工艺参数全部符合质量控制标准,检测所得的堵漏材料性能数据显示,纤维材料呈现出 285MPa 的抗拉强度,超出了标准所定的 250MPa 要求;凝胶材料实现成胶的时间达 23min ,契合 $20 - 30\text{min}$ 的标准范畴,这些数据充分证明了质量标准体系的科学性与实用性。

4.3 持续改进方向

防漏堵漏工艺质量标准需要进一步更新完善,未来聚焦的发展方向有:实施智能预警系统的研发计划,依靠大数据分析预先评估漏失风险;着手新型堵漏材料的开发事宜,诸如温敏型智能凝胶和纳米复合材料等品类;对工艺参数进行精细化管控,实现自适应的调控;评价指标实施动态优化,增强体系的适用性与先进性。主张建立行业共享数据库,收集各类地层漏失特征,同时整理相关应对案例,为质量标准的优化给予数据支持,加大人员培训力度,让现场工程师熟练掌握标准要求以及实施方法,凭借技术创新及管理提升的双轮驱动,持续提高防漏堵漏工艺的质量及可靠性能^[5]。

5 结语

本文就石油钻井工程防漏堵漏工艺的质量标准体系开展系统研究,取得如下主要成果:阐明了钻井液漏失的动态特性及形成原理,建立起基于漏失通道特性的分类评判方法;提出了防漏堵漏工艺所涉及的关键质量控制指标,涵盖预防性指标、应急性指标、效果评价指标三个维度范畴;开发出与之匹配的监测装置和评价手段,达成了针对工艺参数的量化管理;经过现场实际验证,表明该标准体系能显著提升堵漏的成功率以及作业效率。

参考文献

- [1] 孙舜,王志鹏.石油钻井工程的防漏堵漏工艺探讨[J].石化技术,2024,31(07):167-169.
- [2] 张彦军.石油钻井工程的井漏原因和防漏堵漏工艺方案研究[J].科技风,2024,(14):81-83+93.
- [3] 杜飞虎,薛永强,赵显龙.石油钻井工程的防漏堵漏工艺[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(01):150-152.
- [4] 张运生.石油钻井工程质量的分析及其防漏堵漏工艺的研究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(17):38-40.
- [5] 邵方.石油钻井工程防漏堵漏工艺的运用[J].中国新技术新产品,2022,(02):54-57.