

石油工程钻井技术井下复杂及预防策略研究

王梓梁

江汉石油工程有限公司钻井二公司 湖北 武汉 430000

摘要: 本文围绕石油工程钻井井下复杂问题展开研究,明确井漏、卡钻、井斜、井喷等常见类型及典型特征,深入剖析地质条件、钻井技术参数、钻井液性能及现场操作不规范等诱发因素。结合工程实践,从前期地质勘察、钻井工艺优化、钻井液体系改良、现场管理强化四个方面,提出科学可行的预防策略,为降低井下复杂发生率、减少施工损耗、提升钻井施工安全性与效率提供理论依据和实践参考,推动石油钻井工程有序推进。

关键词: 石油工程; 钻井技术; 井下复杂; 预防策略

引言: 石油钻井是油气勘探开发的核心环节,随着油气勘探向深层、复杂地层推进,井下复杂问题频发,严重制约钻井进度、增加施工成本,甚至威胁人员设备安全。当前,井下复杂问题的预防仍存在地质认知不足、技术适配性差等痛点。基于此,本文开展井下复杂问题类型、形成机理及预防策略研究,破解钻井施工难题,对推动石油钻井技术升级、保障油气开发顺利进行具有重要现实意义。

1 石油工程钻井井下复杂问题类型及特征分析

1.1 井漏问题及特征

(1) 井漏的类型划分: 根据漏失通道特征,分为渗透性、裂缝性、溶洞性漏失三类。渗透性漏失多发生于疏松砂层,漏速慢;裂缝性漏失常见于灰岩、页岩地层,漏速波动大;溶洞性漏失多见于碳酸盐岩地层,漏速快、漏失量大,危害最严重。(2) 井漏的核心特征与危害: 核心特征是钻井液消耗量异常增加、井口返出量减少甚至无返出,伴随井内压力下降。危害包括浪费钻井液、延误工期,严重时引发井壁坍塌、卡钻、井喷等次生事故,造成重大经济损失。(3) 井漏的常见诱发因素: 主要有地层孔隙度和渗透率过高、存在天然裂缝或溶洞、钻井液密度过高致井内压力超地层承压能力,以及钻井机械振动破坏井壁等。

1.2 卡钻问题及特征

(1) 卡钻的主要类型: 常见有粘吸卡钻、井塌卡钻、砂桥卡钻、缩径卡钻和落物卡钻。粘吸卡钻因钻井液滤饼与钻具吸附产生;井塌卡钻由井壁坍塌碎屑埋钻导致;砂桥卡钻是钻井液携砂能力不足形成砂桥堵塞井眼。(2) 卡钻的典型特征与影响: 典型特征是钻具无法上下活动、转动困难,泵压异常升高。其影响是导致钻井施工停滞,处理卡钻易造成钻具损坏、井眼报废,大幅增加施工成本和工期。(3) 不同类型卡钻的形成机理: 粘吸卡钻源于

钻具与滤饼间的吸附力和毛细管力;井塌卡钻是井壁岩石强度不足,受钻井液冲刷或压力波动坍塌;砂桥卡钻是钻井液性能恶化,砂粒沉降形成砂桥^[1]。

1.3 井斜与井眼扩大问题及特征

(1) 井斜、井眼扩大的判定标准: 井斜以井斜角为判定依据,超过设计要求(通常 $\leq 3^\circ$)即为井斜;井眼扩大以井径扩大率为标准,扩大率超过10%视为异常。(2) 两类问题的核心特征: 井斜表现为井眼轨迹偏离设计轴线,钻具受力不均;井眼扩大表现为井径大于钻头直径,井壁不规则,钻井液漏失量增加。(3) 对钻井施工的后

续影响: 井斜会影响固井质量,导致套管下入困难;井眼扩大易引发井壁坍塌、卡钻,增加钻井液用量,影响后续完井作业。

1.4 其他井下复杂问题及特征

(1) 井喷问题的特征与危害: 特征是井内流体(油、气、水)不受控制地喷出井口,伴随压力骤升、井口振动。危害极大,易引发火灾、爆炸,污染环境,威胁人员设备安全。(2) 钻井液污染问题的特征与影响: 特征是钻井液性能恶化,如粘度、切力异常变化,失水量增大,固相含量超标。影响是降低钻井效率,加剧井壁不稳定,增加卡钻、井漏风险,还会污染地层。

2 石油工程钻井井下复杂问题形成机理研究

2.1 地质因素导致井下复杂的机理

(1) 地层岩性差异的影响机理: 地层岩性的物理力学性质差异是引发井下复杂的基础。疏松砂岩胶结薄弱,钻井时易坍塌、形成砂桥卡钻;页岩遇水易膨胀剥落,导致井眼缩径引发粘吸卡钻;碳酸盐岩多天然裂缝和溶洞,易诱发井漏,若连通高压油气层还可能引发井喷。(2) 地层压力异常的作用机理: 核心是钻井液液柱压力与地层压力失衡。钻井液密度偏低时,液柱压力不足,高压流体侵入井内易引发井喷;密度过高时,液柱压力超过地层

承压能力,会压裂地层形成漏失通道,同时加剧井壁应力集中,诱发井塌。(3)地质构造复杂区域的影响机制:褶皱、断层、破碎带等区域地层连续性破坏、岩性杂乱。断层破碎带岩石破碎、胶结差,易坍塌漏失;褶皱区域地层应力分布不均,井壁易失稳,且常伴随压力异常,大幅增加井下复杂发生概率。

2.2 钻井技术因素导致井下复杂的机理

(1)钻井参数不合理:参数与地层、工具不匹配易引发问题。钻压过大会压裂地层、损坏井壁、造成钻头泥包卡钻;转速过快加剧井壁冲刷,诱发井斜、井塌;排量不合理则导致钻井液携砂不足,形成砂桥或冲刷井壁致井眼扩大。(2)钻井工具选择与使用不当:工具适配性不足是重要诱因。钻头类型与地层岩性不匹配会降低效率、引发井斜;钻具刚度不足或磨损严重会加剧井眼轨迹偏移;固井工具质量差或使用不当,会留下后续复杂隐患^[2]。(3)钻井工艺流程不规范:井眼清洁不彻底易形成砂桥、卡钻;接单根、起下钻过快产生激动压力,冲击井壁致漏失或坍塌;固井、完井流程不规范,可能导致套管串卡阻、井眼报废。

2.3 钻井液性能因素导致井下复杂的机理

(1)钻井液密度不合理:密度是平衡地层压力的关键,过低无法抑制高压地层流体侵入,易引发井喷、井涌;过高会压裂地层导致井漏,还会增大钻具摩阻、增加粘吸卡钻风险,污染油气层。(2)钻井液粘度、切力异常:过高会增大流动阻力、升高泵压,携砂过强易致岩屑堆积;过低则携砂不足,岩屑沉降形成砂桥,滤饼质量变差,无法保护井壁,易引发井塌、漏失。(3)钻井液失水量超标:大量钻井液渗入地层,页岩遇水膨胀剥落,引发井眼缩径、井塌;疏松地层胶结力下降,砂粒运移形成砂桥;滤饼过厚还会增大钻具摩阻,诱发粘吸卡钻。

2.4 人为操作因素导致井下复杂的机理

(1)操作不规范的直接影响:操作人员操作不当会直接引发井下复杂。起下钻时猛提猛放,产生的激动压力和抽汲压力会冲击井壁,导致井漏、井塌;钻井过程中盲目调整钻井参数,未结合地层条件优化,易引发卡钻、井斜;接单根时操作不熟练,易造成钻具碰撞井壁,损坏井眼。(2)现场管理不到位的间接诱发机制:现场管理疏漏会间接增加井下复杂风险。对钻井设备维护不及时,导致工具故障,如钻头损坏、钻具断裂,引发卡钻、井斜;对钻井液性能监测不及时,无法及时发现性能异常,延误处理时机,导致问题恶化;施工人员培训不足,操作技能不达标,进一步加剧操作不规范带来的

风险。

3 石油工程钻井井下复杂问题预防策略

3.1 基于地质条件的预防策略

(1)钻井前地质勘察与评价优化:钻井前开展全面细致的地质勘察,结合地震勘探、测井等技术手段,精准掌握地层岩性、孔隙度、渗透率等参数,明确天然裂缝、溶洞、断层等复杂地质构造的分布范围和特征。建立完善的地质评价体系,对地层承压能力、地层压力梯度进行科学测算,划分复杂地质风险等级,为钻井方案制定提供精准的地质依据,从源头规避因地质认知不足引发的井下复杂问题。(2)复杂地质区域钻井方案调整策略:针对褶皱、断层、破碎带等复杂地质区域,优化调整钻井方案。对易漏失地层,提前规划防漏钻井液体系和堵漏材料储备;对易坍塌页岩地层,采用防塌钻井工艺,控制钻井速度;对高压油气层,优化钻井液密度设计,预留合理安全系数。同时,调整井眼轨迹设计,尽量避开复杂地质构造核心区域,降低井下复杂发生概率^[3]。(3)地层压力实时监测与预警措施:建立地层压力实时监测系统,利用随钻测井、压力传感器等设备,实时采集井内压力数据,对比分析地层压力与钻井液液柱压力的平衡状态。设置压力预警阈值,当监测到压力异常波动时,及时发出预警信号,同步调整钻井液密度等参数,防范井喷、井漏等突发复杂问题,实现地层压力的动态管控。

3.2 钻井技术优化预防策略

(1)钻井参数的科学设定与动态调整:结合地质勘察结果和钻井工况,科学设定钻压、转速、排量等核心钻井参数,确保参数与地层岩性、钻井工具相匹配。钻井过程中,根据随钻数据反馈,动态调整钻井参数:在疏松砂岩地层,降低钻压、控制转速,减少井壁冲刷;在硬地层,合理提高钻压,保障钻井效率,同时避免参数过高引发井斜、井塌等问题。(2)钻井工具的合理选择与维护保养:根据地层特征和钻井需求,合理选择钻头、钻具等钻井工具,如在硬地层选用金刚石钻头,在易坍塌地层选用防塌钻具。建立完善的钻井工具维护保养体系,定期对钻具、钻头、固井工具进行检查、清洗和检修,及时更换磨损、损坏的部件,避免因工具故障引发卡钻、井斜、井漏等复杂问题,保障钻井工具的正常运行。(3)钻井工艺的优化与规范实施:优化钻井工艺流程,规范井眼清洁、接单根、起下钻、固井等关键环节操作。采用分段钻井工艺,针对不同地层特征调整施工工艺,提高钻井针对性;加强井眼清洁,合理控制钻井液排量,及时携带岩屑,避免岩屑堆积形成砂桥;

规范接单根、起下钻操作,控制操作速度,减少激动压力和抽汲压力对井壁的冲击^[4]。

3.3 钻井液性能优化预防策略

(1) 钻井液体系的针对性选择:根据地层岩性和钻井复杂风险,针对性选择钻井液体系。对易漏失地层,选用防漏型钻井液,提高钻井液的封堵性能;对易坍塌页岩地层,选用防塌型钻井液,加入页岩抑制剂,抑制岩石膨胀剥落;对高压油气层,选用抗污染、抗高温的钻井液体系,保障钻井液性能稳定,有效平衡地层压力。(2) 钻井液性能参数的实时调控:建立钻井液性能实时监测机制,定期检测钻井液的密度、粘度、切力、失水量等核心参数,对比标准参数范围,及时进行调整。当钻井液密度偏低时,及时补充加重剂;当粘度、切力异常时,添加相应处理剂;当失水量超标时,加入降失水剂,确保钻井液性能始终处于最佳状态,有效保护井壁、平衡地层压力^[5]。(3) 钻井液污染的预防与处理措施:加强钻井液污染预防,严格控制钻井过程中污染物的混入,如防止地层流体、岩屑、外界杂质进入钻井液体系。建立钻井液污染应急处理机制,当发现钻井液污染时,及时分析污染类型和程度,采用稀释、净化、添加处理剂等方式,快速处理污染问题,恢复钻井液性能,避免因钻井液污染引发井壁失稳、卡钻等复杂问题。

3.4 人为操作与现场管理预防策略

(1) 操作人员专业技能培训与考核:建立完善的操作人员培训体系,定期开展钻井专业知识、操作规范、应急处置等内容的培训,提升操作人员的专业技能和安全意识。实行严格的考核制度,对操作人员的操作技能、规范掌握程度进行定期考核,考核不合格者不得上岗,确保操作人员能够规范操作,减少人为失误引发的井下复杂问题。(2) 现场施工流程的规范化管理:制定完善的现场施工管理制度,明确各岗位人员职责,规范钻井施工全

流程操作。加强现场监督检查,安排专业监督人员对钻井参数调整、钻井工具使用、钻井液性能调控等环节进行全程监督,及时纠正不规范操作行为。建立施工记录台账,详细记录钻井过程中的各项数据和操作情况,便于后续追溯和问题分析。(3) 应急处置预案的制定与演练:结合钻井过程中可能出现的井漏、卡钻、井喷等复杂问题,制定完善的应急处置预案,明确应急组织机构、应急响应流程、应急处置措施和物资保障方案。定期组织应急演练,模拟各类井下复杂突发场景,提升操作人员的应急处置能力和协同配合能力,确保突发复杂问题发生时,能够快速、有效处置,最大限度降低损失。

结束语

本文系统研究了石油工程钻井井下复杂问题的类型、诱发机理,构建了全方位、针对性的预防策略体系,有效解决了钻井施工中规避井下复杂风险的核心需求。实践表明,强化前期防控、优化技术方案、规范现场操作,能显著降低井下复杂问题发生率。后续可结合实际钻井工程案例,进一步完善预防策略,结合智能化技术提升防控精准度,为石油钻井工程高质量发展提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1]周斌.石油钻井工程技术措施优化研究[J].工程技术,2021,(12):29-33.
- [2]曹克祥.石油工程钻井技术研究[J].石油石化物资采购,2022,(2):25-27.
- [3]魏强强,刘海榕,王博.石油钻井工程中防漏堵漏技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(3):168-170.
- [4]王吉龙,郭东红,谢领.海洋石油钻井中的缺陷以及创新措施[J].化工管理,2022,(14):151-153.
- [5]杨长利.石油工程录井技术及其深化应用探讨[J].江汉石油职工大学学报,2023,36(3):56-57.