

石油钻井井下复杂情况防控对策分析

倪鹏程

中石化华东石油工程有限公司 江苏 南京 210004

摘要: 石油钻井作业中井下复杂情况频发,井漏、井壁失稳、卡钻、溢流井涌等故障严重制约施工安全与效率。本文从地质、工程、人为管理多维度剖析故障成因,梳理当前风险监测、工艺技术、设备保障、现场管理等方面的现存短板。结合钻井施工实际工况,从风险预判、技术工艺、设备物资、管控体系四个维度,提出全方位、针对性的防控对策,旨在降低井下故障发生率,保障钻井作业安全高效开展。

关键词: 石油钻井;井下复杂情况;防控对策

引言: 随着油气勘探开发不断向深层、复杂地层推进,钻井施工面临的地质条件与作业环境愈发复杂。井下各类复杂情况频发,易引发停工、设备损坏甚至井喷等安全事故,不仅增加施工成本、延误工程进度,还极大威胁现场作业安全。为有效规避钻井施工风险,提升井下复杂情况防控水平,本文系统分析井下常见故障类型及成因,总结现存防控短板,制定科学可行的全方位防控对策,为复杂地层钻井施工提供技术与管理参考。

1 石油钻井井下常见复杂情况及成因机理分析

1.1 井下复杂情况主要类型及特征

(1) 井漏故障:可分为渗透性、裂缝性、溶洞性漏失三类,主要特征为钻井液损耗速度快、井内液柱压力失衡,直接造成钻井效率大幅下降,该故障多发生于疏松地层、地层破碎带及碳酸盐岩地层。(2) 井壁失稳故障:核心表现为井壁坍塌、井眼缩径、地层掉块,极易引发卡钻、埋钻等次生事故,高发于水敏性泥岩、高压破碎地层,会造成井眼质量不达标,阻碍后续钻井、固井等各项作业。(3) 卡钻故障:包含压差卡钻、键槽卡钻、沉砂卡钻三种类型,故障发生后会出现钻具起下受阻、转动困难等问题,整体处理难度大,会造成长时间作业停工,严重影响施工进度。(4) 溢流与井涌故障:多因地层压力异常、井内液柱压力不足导致,属于高危井控风险,若处置不及时极易诱发井喷事故,对钻井现场人员、设备及作业安全造成极大威胁^[1]。

1.2 地质因素诱发复杂情况机理

(1) 地层压力异常:井下高压地层与低压漏层交替分布,地层压力窗口较窄,难以匹配适宜的钻井液密度,极易引发溢流、井漏等井下复杂问题。(2) 地层岩性复杂:泥岩水敏性强、砂岩渗透性高、碳酸盐岩裂缝溶洞发育,不同岩性地层适配的钻井工艺差异较大,易诱发井壁失稳、井漏等故障。(3) 地质构造复杂:工区断层、

破碎带、褶皱构造发育,地层整体完整性差,钻井施工扰动地层后,易出现地层坍塌、钻井液漏失等异常工况。

1.3 工程作业诱发复杂情况机理

(1) 钻井液性能不合理:钻井液密度、黏度、滤失量等关键参数不达标,封堵能力、润滑性能、护壁性能不足,无法适配复杂地层施工工况,进而诱发井壁失稳、压差卡钻、井漏等各类井下问题。(2) 钻井参数操控不当:施工过程中钻压、转速、排量等参数设置不合理,钻进作业对井壁产生过度扰动,破坏原生地层结构稳定性,最终引发井眼坍塌、沉砂堆积及沉砂卡钻故障。(3) 井身结构设计缺陷:井段划分不合理、套管层次配置不足,无法适配复杂地层的压力分布特征,导致井下压力防控屏障存在漏洞,无法有效抵御各类井下施工风险。

1.4 人为与管理因素诱发机理

(1) 操作人员专业能力不足:现场岗位人员风险识别能力薄弱,对井下工况变化敏感度不足,施工过程中存在违规简化作业流程、参数调整不及时等问题,人为诱发各类井下复杂故障。(2) 现场管控体系不完善:施工现场风险预判、过程监督、应急处置机制不够健全,普遍存在重生产、轻安全的问题,隐患排查整改不彻底,导致微小安全隐患逐步升级为严重井下复杂事故。

2 石油钻井井下复杂情况防控现存问题

2.1 风险预判与监测技术短板

(1) 前期地质预判精度不足:目前钻井前期地质勘察多依赖传统地震探测数据和邻井历史施工数据,技术手段相对滞后。三维地层压力建模精细化程度较低,难以精准预判地下隐蔽性漏层、破碎带以及高压异常地层的分布情况。由于对井下复杂地质条件识别不全面,导致钻井前置防控方案针对性不足,前期准备工作存在漏洞,为后续井下复杂故障埋下隐患。(2) 随钻动态监测能力薄弱:多数钻井现场井下实时监测设备覆盖率较低,

智能化监测设备应用不足。施工过程中,井下压力、钻井液性能、井壁稳定状态等关键参数的数据采集存在滞后性,数据传输延迟、更新不及时,无法精准捕捉施工过程中的细微工况变化,导致风险预警滞后,难以实现早发现、早处置,小幅隐患极易发展为严重井下复杂问题。

2.2 现场防控技术工艺不完善

(1) 钻井液体系适配性差:现场多采用通用型钻井液体系,适配范围有限,针对深层、高温、高压、水敏等特殊复杂地层,其抗温、防塌、封堵、抑盐性能难以满足施工要求。无法根据地层特性动态调整钻井液配方,防控效果大打折扣,极易引发井壁失稳、井漏、卡钻等故障。(2) 复杂工况处置工艺单一:钻井施工常出现井漏、坍塌、溢流等多故障叠加的复杂工况,但现场缺乏成熟的组合式防控处置工艺。传统单一处置方法针对性弱、作业效率低,难以适配叠加复杂工况,容易出现处置过度破坏地层结构或处置不足无法消除风险的问题,加剧井下复杂情况^[2]。(3) 井身结构优化不足:现阶段井身结构设计模式较为固化,多沿用常规设计方案,未能结合实钻过程中的地层压力变化、地质构造差异动态优化调整。井段划分、套管配置缺乏灵活性,对复杂地层风险的防控针对性不足,防控屏障作用难以充分发挥。

2.3 设备与物资保障不足

(1) 核心防控设备老旧:部分钻井施工现场的监测设备、控压设备服役时间较长,设备老化、精度偏差较大,整体智能化、精细化水平不足。无法精准采集井下工况数据、稳定控制井内压力,难以满足复杂地层精细化防控的施工需求。(2) 应急物资储备不完善:现场应急防控物资存在种类单一、储备量不足的问题,各类专用堵漏材料、防塌助剂、应急作业工具配备不全。面对不同类型、不同程度的井下复杂故障,无法快速调配物资开展处置工作,严重影响应急处置效率。

2.4 现场管理与人员体系漏洞

(1) 管控制度落实不到位:钻井标准化作业流程、风险分级管控机制、隐患排查闭环治理制度流于形式。现场施工监管松懈,隐患排查不全面、整改不彻底,未能从源头规避施工风险,各类违规操作、不合理施工问题频发。(2) 人员专业素养参差不齐:一线作业人员专业培训体系不完善,多数人员仅掌握常规钻井操作技能,缺乏复杂工况识别、风险预判及应急处置的实操经验,面对突发井下复杂情况时操作不规范,易扩大施工风险。(3) 应急处置体系不健全:现场应急预案通用性强、针对性弱,无法适配各类复杂井下故障。同时应急常态化演练开展不足,人员应急处置流程不熟练,突发事故响应速度慢、处

置流程混乱,导致小隐患升级为重大井下安全事故。

3 石油钻井井下复杂情况全方位防控对策

3.1 优化前置风险预判与动态监测体系

(1) 构建精细化地质预判模型:为解决传统地质预判精度不足的问题,需整合多源地质数据开展综合分析,深度融合地震反演资料、区域地质勘察数据、邻井实钻数据以及随钻测井实时数据,搭建高精度三维地层压力场与地质构造模型。通过模型可精准定位井下隐蔽漏层、高压异常地层、破碎带及裂缝发育区域,全面掌握井下地层岩性、压力分布规律。结合不同井段地质风险特征,提前编制专项前置防控方案,针对性制定防漏、防塌、防溢流预处理措施,从源头降低井下复杂故障发生概率。(2) 完善随钻实时监测系统:全面升级现场监测设备配置,大范围部署智能化随钻监测设备、井下压力实时采集装置,实现钻井全过程动态监测。实时采集井内液柱压力、钻井液密度、黏度、滤失量及井壁稳定性等核心参数,搭建一体化数据采集、传输、分析预警平台。依托大数据技术对监测数据进行实时分析,及时捕捉井下工况细微异常变化,改变传统滞后式预警模式,实现井下风险早识别、早预警、早处置^[3]。(3) 建立动态风险评估机制:摒弃固定式风险管控模式,建立全钻进周期动态风险评估机制。结合实钻进度、地层揭露情况、监测数据变化,实时更新井下风险等级,动态识别新增隐患与潜在风险。根据风险等级变化及时调整钻井防控方案、施工参数和管控重点,实现从静态预判向动态管控转变,保障全井段钻井施工安全可控。

3.2 升级核心钻井防控技术工艺

(1) 定制化优化钻井液体系:针对不同地层的岩性、温度、压力特征,推行定制化钻井液配比方案。对于水敏性泥岩地层选用高性能水基钻井液,深层高温高压地层适配油基钻井液,同时按需添加纳米封堵剂、极压润滑剂、防塌助剂。精准调控钻井液密度、滤失量、流变参数,有效提升钻井液的封堵、防塌、防漏、润滑性能,适配复杂地层施工需求,规避钻井液性能不匹配引发的各类井下故障。(2) 优化钻井施工参数:摒弃固化参数施工模式,结合实钻地层硬度、完整性、压力特征,动态优化调整钻压、转速、泵排量等核心施工参数。在破碎带、疏松地层降低钻压、放缓转速,减小机械钻进对井壁的冲击扰动,避免破坏原生地层结构;在稳定地层合理匹配参数提升施工效率,有效降低井壁坍塌、沉砂堆积、卡钻等风险。(3) 科学优化井身结构设计:基于地层压力梯度、地质构造分布及压力窗口特征,科学划分井段区间,合理优化套管层次与下入深度。针对高低

压交替地层、裂缝发育地层,增设防护套管,弥补传统井身结构设计固化、防护不足的缺陷,搭建多层次、全方位的井控安全屏障,提升复杂地层风险防控能力^[4]。(4)创新复杂工况组合处置工艺:针对现场井漏、坍塌、溢流多故障叠加的复杂工况,打破单一处置工艺局限,建立“先稳井、后处置、再优化”的一体化组合处置工艺。优先稳定井内液柱压力、加固井壁,杜绝风险持续扩大,再根据故障类型精准实施堵漏、解卡、控压作业,施工完成后优化钻井工艺参数,从根本上消除复合工况隐患,提升故障处置质量与效率。

3.3 完善设备物资智能化保障体系

(1)更新智能化防控设备:全面淘汰老旧、精度不足的监测与控压设备,积极引入智能随钻测控系统、自动控压钻井系统、井下实时成像监测设备等智能化装备。依托智能设备实现井下工况高精度采集、精准调控与自动预警,解决传统设备数据偏差、监测滞后等问题,全面提升井下复杂情况精细化防控能力。(2)优化应急物资储备:结合工区常见井下故障类型,多元化储备专用堵漏材料、防塌助剂、解卡工具、应急控压设备等物资,丰富物资储备种类与数量。建立物资分区存放、分类管理机制,定期开展物资校验、更换与盘点,杜绝物资过期、缺失问题,保障突发井下故障可快速调取物资、高效开展处置作业。(3)建立设备物资动态管理机制:搭建设备物资动态管控台账,实时跟踪各类防控设备运行状态、作业工况,严格执行定期维护、检修、校准制度,及时修复故障设备。同步动态监控应急物资储备量,根据施工进度与风险等级及时补充更新,常态化筑牢钻井施工硬件保障基础^[5]。

3.4 健全现场管控与人才培养体系

(1)完善标准化管控制度:构建“风险预判-过程管控-隐患整改-复盘优化”的全流程闭环管理体系,细化钻井各工序、各岗位标准化操作规范,明确岗位安全职责与防控责任。强化施工全过程监督管控,严格落实风

险分级管控、隐患闭环整改制度,杜绝违规操作、简化流程等问题,让防控措施落地落实。(2)强化专业人才培养:建立常态化人才培养机制,定期组织技术人员、一线操作人员开展复杂地层钻井工艺、风险识别、参数调控及应急处置专项培训。结合现场工况开展实操演练,针对性提升人员对井下复杂情况的预判、识别和处置能力,解决人员专业能力参差不齐、实操水平不足的问题。(3)优化应急处置机制:细化井漏、井塌、溢流、卡钻等各类井下故障的专项应急预案,摒弃通用化预案模式,贴合现场复杂工况制定针对性处置流程。定期开展实战化应急演练,优化应急响应流程、明确人员分工,提升团队协作处置能力,确保突发风险可快速、规范处置,有效杜绝隐患升级、风险扩大。

结束语

本文全面分析了石油钻井井下各类复杂故障的特征与诱发机理,明确了当前防控工作技术在技术、设备、管理、人才等方面的突出问题。针对性构建了风险监测、技术升级、物资保障、现场管控一体化防控体系,可有效解决复杂地层钻井施工难题。通过落实全方位防控对策,能够从源头降低井下故障风险,提升钻井施工安全性与稳定性,对推动石油钻井工程规范化、安全化开展具有重要的实践意义。

参考文献

- [1]国辉,侯靖杰.关于石油井控分析和压井技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,37(19):182-185.
- [2]崔文宏.石油钻井技术管理措施的创新实践[J].化工设计通讯,2024,43(9):235-237.
- [3]金业权,方传新,纪永强.石油钻井井控风险诱因专家调查分析[J].中国安全生产科学技术,2022,8(8):74-78.
- [4]何博.井下作业常见安全事故及应对措施[J].中国化工贸易,2025,11(15):215-218.
- [5]全震.井下作业中的安全防范措施分析[J].化学工程与装备,2023,25(8):327-329.