

设备。在关键节点设置冗余传感器以保证参数读取的准确性，风险识别系统在每轮数据刷新中自动执行趋势外推判断，若发现参数波动进入预警阈值，应提前锁定高风险区域作业指令，避免状态进一步恶化。

作业过程实施全周期视频与数据同步监控，并配置自动语音预警模块用于异常信号实时提示。所有高风险作业现场应启用区域隔离功能，非作业人员必须离开控制区域，并在风险处置结束后再恢复现场作业。监控数据实时回传至中控平台，由风控模块和专家系统并行分析，若判断为持续高风险趋势，系统自动延长风险处理时间窗口，延后操作解锁。各类强管控措施需嵌入作业流程系统中强制执行，防止绕开或跳过关键检查环节，形成闭环控制结构。

4 应用验证与效果评估

4.1 钻井现场试点的系统部署流程

选取西北某陆地钻井平台开展系统部署试点，作业深度 3200 米，场地具备标准化井口装置与可扩展通信接口。部署方案依据井场空间结构、关键设备布置图与作业节点节奏，完成前端采集单元、边缘计算节点和后端平台模块的协同设计。前端共安装 23 组传感装置，覆盖井口、钻柱、泥浆泵、操作平台等区域，布设点位依照高风险概率密度函数划分结果执行^[3]。边缘节点具备数据缓存、初筛与编码压缩功能，采用 MQTT 协议与主控平台建立异步通信机制，支持断点重连与缓冲重发，保障数据完整性。平台端部署识别模型引擎与策略响应模块，调试中完成与现场作业终端的操作权限交互协议绑定，实现模型输出结果直接影响作业系统权限控制，实现风险识别与操作闭环响应的联动功能。

4.2 识别与管控效果的性能指标评估

性能评估指标选取识别准确率、误报频次、响应时延、风险事件处理闭环率四个维度，对系统运行前后各 50 个典型作业周期内的数据进行对比分析，形成系统性能响应结构化测量样本。评估采用滑动时间窗口统计分析方法，以动态数据记录日志为输入源，控制变量为作业强度与气象环境基本一致的工况条件。

为更直观展示风险识别系统在不同运行阶段的性能差异，选取启用前后四项核心指标的对比数据绘制折线图，如下图 1 所示。

识别准确次数从 41 次提升至 47 次，说明模型能捕捉更多真实风险状态。响应时延从 9.6 秒缩短至 3.2 秒，系统具备快速反馈能力。误报频次显著减少，降低了作业干扰风险。闭环处理成功次数增加 14 次，反映出响应机制覆盖完整、执行链条稳定，有效支持风险分级策略落地。

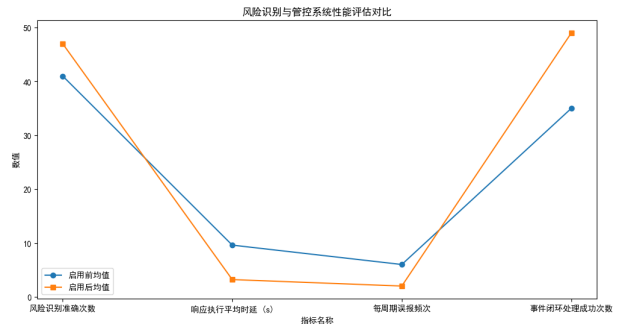


图 1 风险识别与管控系统性能评估对比

4.3 管理体系对事故预防的实际作用

试点阶段作业现场事故数据采集周期为 45 天，分别统计系统启用前后井喷预警误判、高温泵站停机、钻柱卡阻等典型事件数量与响应结果。启用前共发生高风险事件 17 起，其中 10 起无预警信号且需人工停工干预；启用后事件总数下降至 7 起，所有风险状态均被系统提前识别并触发响应策略。作业平均恢复时间由 41 分钟缩短至 19 分钟，作业班组报告显示系统提示介入频率合理，未出现大规模误导性停工记录。数据联动日志显示在连续出现风险波动状态时，系统保持多轮趋势识别一致性，无明显延迟积压或异常跳变。管理平台记录表明分级响应机制上线后，作业过程中的动态风控干预频率与决策指令执行率存在高度一致性，保障了风险事件在高负荷环境下的稳定管控能力。

5 结语

研究构建了面向钻井现场的风险动态识别与分级管控体系，实现了从数据采集、风险识别到响应执行的闭环结构。系统采用多源传感融合和 LSTM 时序分析模型，完成风险因子的量化建模与状态预测；基于双因子矩阵的分级算法实现了多等级风险实时评估；响应模块以等级信号驱动权限管控，形成快速干预机制。现场试点表明识别准确性显著提升，响应时延大幅缩短，风险事件处置闭环率得到提高，系统具备稳定的实时运行性能与工程可扩展性。未来可结合多井协同数据构建区域风险图谱，提升钻井作业安全智能化水平。

参考文献

- [1] 张利利. HSE管理体系在钻井现场监督工作中的应用[J].石化技术,2024,31(11):321-323.
- [2] 张国磊,王健群,刘丽莉. 钻井现场作业中人的不安全行为分析与管控[J].化工管理,2024,(08):154-157.
- [3] 陈广成. 石油钻井作业现场的安全监督及治理措施[J].化工设计通讯,2023,49(10):25-27.

Well Control Technology and Safe Drilling Process for Narrow-Density Window Formations

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 gradually shift from shallow to deep and complex formations, drilling operations in narrow-density window formations are prone to complex issues such as wellbore leakage, blowouts, and collapses, which significantly limit the safety and efficiency of drilling operations. Based on this, the research focuses on key aspects of well control in narrow-density window formations, including: precise pressure monitoring, in-situ leak detection, precision pressure-controlled drilling, optimization of wellbore structure, and high-performance drilling fluid systems. By integrating these technologies, the aim is to control downhole pressure, maintain wellbore stability, and achieve safe and efficient drilling. The results indicate that drilling operations in narrow-density window formations should center on precision drilling, enhance coordination among various processes, establish risk early-warning mechanisms, and provide technical support for oil and gas development in complex formations.

Keywords

narrow density window; formation; well control technology; drilling process

窄密度窗口地层井控技术与安全钻井工艺

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由浅层进入深层、复杂地层, 在窄密度窗口地层进行钻井的过程中, 极易发生井漏、井涌和井塌等复杂问题, 极大程度上限制了钻井作业的安全与高效。基于此, 从窄密度窗口地层形成机理、窄密度窗口地层井控风险角度出发, 对窄密度窗口地层井控重点开展的研究内容包括: 精细压力监测、随钻堵漏、精细控压钻井、井身结构优化、高性能钻井液体系, 通过对以上技术集成应用来达到控制井下压力、保持井壁稳定, 实现安全高效钻井。其结果表明针对窄密度窗口地层进行钻井作业时以精细钻井为中心, 强化各种工艺之间的协同, 建立风险预警机制, 为复杂地层的油气开发提供技术支持。

关键词

窄密度窗口; 地层; 井控技术; 钻井工艺

1 引言

在油气钻井工程中, 维持地层压力和井筒流体压力处于动态平衡状态, 是保证作业安全的关键, 在深层次高应力或者脆性地层中, 常常出现“窄密度窗口”的情况, 这是由于地层孔隙压力和地层破裂压力之差较小, 当出现较大的压力波动时容易出现井漏、井涌、井喷, 严重会出现井壁坍塌和井眼塌陷等情况, 大大降低了钻井速度和钻井安全程度。近年来, 由于勘探对象从浅层向深层方向转变, 窄密度窗口地层钻井越来越多, 因此要针对窄密度窗口地层的特殊环境, 提出相应的井控技术和安全钻井工艺。由于传统的钻井

技术大多以静态压控为主, 很难满足窄密度窗口地层的动压力要求, 一旦钻井液密度选择不当或是井下工况发生突发状况, 往往容易造成井下出现一些复杂的状况, 因此需要从精细的压力管控、完善工艺及创新发展材料等方面入手, 建立一套以“动态控制、主动预防”为核心的方案。从窄密度窗口地层形成原因入手, 着重介绍了其井控关键技术以及安全钻井工艺, 希望本文能为相关地层的安全钻井提供理论指导和技术参考。

2 窄密度窗口地层的成因与特征

2.1 地质成因分析

2.1.1 高地层应力与低破裂压力共存

在构造活动频繁区域, 如造山带前缘、断层密集带等, 地壳内部应力状态复杂。强烈的构造挤压作用导致水平地应

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

力显著增大,形成高地应力环境。与此同时,频繁的构造运动使岩体产生大量微裂缝和节理,显著降低了地层的抗张强度,导致破裂压力下降。更为复杂的是,在这些封闭性良好的构造圈闭中,由于烃类生成作用或流体封存效应,孔隙压力往往异常升高。这种“高孔隙压力-低破裂压力”的极端组合,使得安全密度窗口被急剧压缩,给钻井作业带来极大挑战。

2.1.2 地层非均质性与裂缝发育

碳酸盐岩地层、火成岩裂缝性储层和强烈风化剥蚀地层的非均质性最严重,在这些地层中,不同规模、不同方向的天然裂缝系统发育,形成错综复杂的渗流通道。钻井时,钻井液在正压差作用下容易从裂缝处流失,导致钻井液消耗大;且容易造成井壁失稳。裂缝的存在会使岩体整体强度降低,导致地层在钻井液柱压力作用下更容易被破坏。如果裂缝中充填的是较为软弱的物质,则对钻井液密度窗口的要求就更严格了。

2.1.3 压力衰竭效应

在经过长时间开发的油气田,储层流体采出后,原始地层压力系统遭到破坏,产生压力衰竭,孔隙压力减小后,有效应力重新分布,地层上覆岩层的负载更多地由岩石骨架承担。由于该应力转移作用,近井地带的地层破裂压力会相应降低。多层系开发油气田的各个层位压力衰竭程度不同,构成复杂压力剖面,会导致油气井的裸眼段既有正常压力系统又存在衰竭压力系统,这会使钻井作业更加困难。

2.2 工程特征表现

2.2.1 压力敏感性强

窄密度窗口地层对于压力的敏感度很大,有些情况下即使钻井液密度只改变 $0.02 \sim 0.05\text{g/cm}^3$ 也会造成严重事故(井漏或溢流)。产生以上情况的原因主要是地层的压力平衡较脆弱。地层的压力系统一旦发生微小的变动,就会造成严重的影响:当钻井液密度略微超过地层破裂压力时,钻井液便进入了地层中微细的裂缝中,并且可能沿裂隙横向扩展到更大的范围而造成漏失;反之,如果钻井液密度略微低于地层孔隙压力,则地层中的流体会瞬间大量进入井筒中形成溢流。所以,只有保证钻井过程中压力的精确控制才不会出现严重的井控事故。

2.2.2 井壁稳定性差

裂缝的扩展和连通造成了井眼的剥落。然后,钻井液与地层岩石之间产生化学作用,会使井壁更容易丧失稳定性,尤其是在地层中含有大量黏土矿物时。另外,当存在地应力各向异性的条件下,当最大水平主应力的作用方向与井眼走向一致时容易出现井眼的坍塌;而当最小水平主应力的作用方向与井眼走向相同,则容易出现拉伸破坏,这种不稳定机理往往是相互联系的,同时使井壁不稳定的问题更加复杂。

2.2.3 工况诊断复杂

在窄密度窗口地层钻井时,常常会发生“漏涌同存”的复杂工况,即将发生漏失或已发生漏失的同时又出现溢流,在同一个裸眼段里可能会同时有这两种现象,所以这种工况一般会出现在地层内具有多个压力系统或裂缝网络分布不均的地层里,工况诊断方法已经无法解决此类问题。除此之外还要利用实时监测的数据、地层条件和工程参数等资料结合分析。“井下复杂工况”具有突发性和快速变化的特点,对现场人员识别能力、操作技术提出了很高的要求。

3 窄密度窗口地层的井控关键技术

3.1 精细压力监测与预警技术

精细压力监测预警是窄密度窗口钻井的重要基础和前提条件,利用现代化的随钻压力监测系统,把井下井口处的高精度压力传感器采集的环空压力、立管压力和井底压力等参数,通过高速数据传输通道传输到地面,再由地面的数据采集装置采集数据并对数据进行预处理及分析运算,利用经验的地层压力预测模型,建立整个井下的压力剖面,使得钻井过程中高压溢流或压差等诱发情况能在第一时间被探测到并及时予以解决。这就要求监测系统必须具有高采样率、高精度,以便于及时发现极小的压力变化;同时还可以利用综合监测的数据以及随钻测井资料、岩屑分析资料等相关数据进行结合解释后,对井下的压力情况进行更好的判断,特别需要注意的是监测系统应该可以分辨出一些压力异常的先兆信息,比如:立压有微小的变化或是出现异常的气体显示等情况,以便于为以后的井控工作预警。

3.2 精细控压钻井技术

细化控压钻井技术是实现窄密度窗口地层安全钻井的重要措施,主要包括精确控制井口回压、钻井液排量和密度等参数,使得井底压力始终控制在安全窗口范围之内。系统主要包括节流管汇、回压泵、自动控制系统等部分,形成立体压力控制闭环。对于动态压力补偿而言,根据实时采集的数据随时调整节流阀开度和回压泵排量等,补偿因作业工况变化而产生的压力波动,在起钻过程中自动增大回压补偿抽吸影响,在下钻时适当减少回压以减小压力激动作用。这种动态补偿使钻井过程中井底压力更加稳定。闭环控制也是精细控压钻井中非常重要的一部分,将井下压力传感器、地面监测设备、控制执行机构进行了有效组合,实现了压力的自动调节。控制算法能根据地层和工况,计算出合理的控制参数,并通过执行机构实现精确控制。这种控制代替了人工作业,减少的人为控制误差,且更加迅捷准确。

3.3 随钻堵漏与井筒强化技术

随钻堵漏技术和井筒强化技术能够有效地拓展有效密度窗口。通过在钻井液中添加特种堵漏材料实现地层微裂缝的随钻封堵,进而提高地层承压能力,进而达到延拓地层承压窗口的目的。可以根据裂缝的尺寸以及地层特点选择合适