

石油钻井工程中防漏堵漏技术探讨

刘森彪

中石化中原石油工程公司海外工程公司 河南 濮阳 457001

摘要: 石油钻井工程中, 防漏堵漏技术是保障钻井安全与效率的关键。技术涵盖漏失机理分析、风险评估模型构建, 以及防漏材料与工艺创新。通过优化井身结构、动态管理钻井液密度窗口, 结合刚性颗粒、柔性暂堵剂及智能响应材料等新型堵漏剂, 配合随钻环空压力监测、流变性能优化等物理防漏手段, 形成多层次防漏体系。智能监测系统与动态决策模型的应用, 进一步提升了漏失预警与处理能力。

关键词: 石油钻井工程; 防漏; 堵漏技术

引言: 在石油钻井工程领域, 钻井过程中因复杂地质条件引发的漏失问题, 一直是制约钻井效率、增加成本并威胁井控安全的关键因素。从浅部疏松砂岩的孔隙渗漏, 到深部致密地层的裂缝性漏失, 漏失形式多样且成因复杂。传统防漏堵漏技术多依赖经验判断, 存在响应滞后、封堵效果不稳定等局限。因此, 系统探讨防漏堵漏技术机理, 结合材料创新与智能监测手段, 构建精准化、动态化的防漏体系, 成为行业亟待解决的重要课题。

1 钻井漏失机理与风险评估

1.1 漏失通道类型与成因分析

(1) 漏失通道类型主要分为三类: 一是天然裂缝型漏失, 由地层在地质构造运动中形成的天然裂缝网络导致, 裂缝的开度、密度及连通性直接决定漏失程度, 常见于页岩、碳酸盐岩地层; 二是诱导裂缝型漏失, 因钻井过程中井筒内液柱压力超过地层破裂压力, 人为诱发新裂缝产生, 多发生在深井、超深井的致密岩层中; 三是孔隙型漏失, 源于地层孔隙度较高且孔隙连通性好, 钻井液沿孔隙缓慢渗漏, 主要出现在砂岩、砾岩等疏松地层。(2) 人为诱发因素包含两大关键环节: 一方面是钻井液性能失配, 若钻井液密度过高, 会增大井筒液柱压力, 易突破地层承压极限, 而流变性不佳(如黏度、切力异常)会导致环空压耗升高, 间接加剧漏失风险; 另一方面是工程操作失误, 起下钻速度过快会引发“抽汲效应”或“激动压力”, 前者导致井筒压力骤降引发地层流体侵入, 后者使压力瞬时升高击穿地层, 均为诱发漏失的常见操作问题^[1]。

1.2 漏失风险定量评估模型

(1) 基于岩石力学参数的漏失压力预测: 通过测井数据获取地层弹性模量、泊松比等岩石力学参数, 结合地应力计算模型, 建立漏失压力与地层力学特性的关联方程, 可定量确定不同井段的安全钻井液密度窗口, 为

预防漏失提供基础参数支撑。(2) 机器学习辅助的漏失概率预测(XGBoost算法应用): 以历史钻井漏失案例为样本, 提取井深、地层岩性、钻井液性能等特征变量, 利用XGBoost算法的强特征学习能力, 构建漏失概率预测模型。该模型可通过实时输入钻井作业数据, 动态输出漏失发生概率, 同时通过特征重要性分析识别关键风险因子, 提升风险预警的时效性与准确性。

2 石油钻井工程中防漏技术体系与材料创新

2.1 工程预防措施

(1) 井身结构优化: 针对复杂地层的压力差异, 采用多级套管分层隔离技术, 通过精准计算不同井段的地层承压能力, 确定套管下入深度与尺寸。例如在浅部疏松地层与深部高压地层过渡段, 下入一级技术套管隔离易漏层段; 在超深井的致密裂缝发育段, 增设二级承压套管, 形成“分段承压、逐级防护”的井身结构, 避免单一套管因跨距过大导致的压力失控, 从空间维度阻断漏失通道的纵向延伸。(2) 钻井液密度窗口动态管理: ECD(等效循环密度)是反映钻井液在循环状态下对地层实际压力的关键指标, 通过实时监测钻井液黏度、排量、井眼清洁度等参数, 结合井眼轨迹计算模型, 动态调整钻井液密度。例如在水平井段钻进时, 因环空岩屑床易堆积导致ECD升高, 通过降低钻井液塑性黏度、提高排量, 将ECD控制在“地层漏失压力-破裂压力”的安全窗口内; 同时利用随钻压力监测系统, 实时反馈井下压力变化, 实现密度调整的及时性与精准性, 避免静态密度设计与动态作业工况不匹配引发的漏失^[2]。

2.2 化学防漏材料

(1) 刚性颗粒材料: 以天然核桃壳或人工合成碳酸钙为核心, 通过“粗-中-细”三级颗粒级配, 形成立体封堵体系。粗颗粒(粒径0.5-2mm)作为骨架支撑, 优先进入大裂缝或孔隙通道; 中颗粒(粒径0.1-0.5mm)填充粗

颗粒间隙；细颗粒（粒径 $<0.1\text{mm}$ ）封堵微小孔隙，三者协同形成“致密滤饼”，阻断钻井液进一步渗漏。此类材料适用于孔隙型漏失与中等裂缝漏失，具有成本低、封堵强度高、易降解的特点，尤其在浅部砂岩、砾岩层漏失治理中应用广泛。（2）柔性暂堵转向剂：聚合物微球（如丙烯酸胺类微球）具有良好的弹性与变形能力，遇压后可压缩变形，适应不规则漏失通道的形状；纤维复合材料（如聚酯纤维、玻璃纤维）则通过交织形成网状结构，与微球协同构建“弹性封堵层”，既能封堵漏失通道，又能在钻井作业结束后通过酸化解堵或水力冲刷解除封堵，避免对储层造成永久性伤害。该类材料多用于水平井储层段的暂堵防漏，兼顾防漏效果与储层保护。（3）智能响应材料：采用温敏性或pH敏感性高分子材料（如聚N-异丙基丙烯酰胺、羧甲基纤维素接枝共聚物），通过分子设计赋予材料“环境响应”特性。例如温度触发型堵漏剂在常温下呈粉末状，进入井下后（温度 $>60^{\circ}\text{C}$ ）迅速膨胀至原体积的5-10倍，填充漏失通道；pH触发型堵漏剂在钻井液碱性环境（ $\text{pH} = 8-10$ ）下保持稳定，接触地层酸性流体（ $\text{pH} < 6$ ）时发生交联固化，形成高强度封堵体。此类材料适用于深井、超深井的复杂漏失场景，实现“精准定位、智能封堵”。

2.3 物理防漏工艺

（1）随钻环空压力监测与调整：MPD（控压钻井）系统通过井口压力控制装置、随钻压力传感器与数据采集系统的协同，实时采集环空压力、钻井液进出口流量、井底压力等参数，通过闭环控制算法自动调节井口回压或钻井液排量。例如当监测到环空压力异常升高（接近漏失压力）时，系统自动降低井口回压；当发现流量差值增大（提示漏失发生）时，立即减少排量并启动堵漏程序，实现“实时监测-自动预警-快速调控”的一体化防漏，尤其适用于窄安全密度窗口地层的钻井作业。（2）钻井液流变性能优化：针对钻井液在环空流动中的压力损失，采用非牛顿流体（如幂律流体、宾汉流体）流变模型，通过添加减阻剂（如聚醚类聚合物、纳米二氧化硅）降低钻井液的屈服应力与黏度。例如将钻井液设计为“低黏度、低切力”的幂律流体，在循环过程中减少与井壁的摩擦阻力，降低环空压耗；同时保证钻井液的悬浮能力，避免岩屑沉降导致的井眼堵塞，通过流变性能的优化，在满足携岩需求的同时，最大限度降低对地层的压力冲击，减少漏失诱因^[1]。

3 石油钻井工程中堵漏技术分类与工艺优化

3.1 漏失分级与堵漏策略

（1）微漏（ $<5\text{m}^3/\text{h}$ ）：以“低成本、不中断钻进”

为原则，采用随钻补充超细碳酸钙、云母粉等惰性材料的方式，通过物理填充微小孔隙实现封堵，同时维持钻井液正常流变性能，避免因处理措施影响钻进效率。

（2）中漏（ $5-20\text{m}^3/\text{h}$ ）：需暂停常规钻进，注入预配的桥接堵漏浆（如核桃壳与纤维复配体系），利用泵压将堵漏材料推送至漏失通道，形成临时封堵层；后续钻进中实时监测漏速，动态调整钻井液密度与黏度，巩固封堵效果。（3）严重漏失（ $>20\text{m}^3/\text{h}$ ）：优先采用高强度封堵方案，如注入水泥浆与化学凝胶的复合体系，通过水泥的固化作用与凝胶的膨胀特性，实现漏失通道的永久封堵；若封堵失败，需考虑下入套管隔离漏失层，避免钻井液持续大量漏失引发井塌风险。

3.2 常规堵漏方法

（1）桥接堵漏：以不同粒径的刚性颗粒（如碳酸钙、石英砂）为“骨架”，在漏失通道入口形成颗粒架桥；同时加入柔性纤维（如聚酯纤维、植物纤维），填充颗粒间隙并缠绕形成网状结构，增强封堵层的致密性与抗冲刷能力。该方法适用于中浅井的孔隙型与中小裂缝漏失，具有成本低、施工便捷的优势。（2）化学凝胶堵漏：以聚丙烯酰胺为基料，加入铬盐、醛类等交联剂，形成具有高黏度、高弹性的凝胶体系。凝胶注入漏失通道后，可快速吸附在通道壁面并逐步固化，通过物理堵塞与化学黏结双重作用阻断漏失；尤其适用于渗透性漏失与微小裂缝漏失，封堵后不易因钻井液循环被冲刷^[4]。

3.3 特种堵漏技术

（1）水泥浆-化学堵漏剂复合堵漏：针对大裂缝、溶洞型严重漏失，先注入低失水水泥浆，利用水泥的高强度固化特性构建基础封堵层；再注入弹性化学堵漏剂（如聚氨酯类），其可渗透至水泥浆未填充的微小缝隙，遇水膨胀后填补空隙，形成“刚性支撑+柔性密封”的复合封堵结构，大幅提升封堵层的承压能力。（2）膨胀管永久封堵技术：通过钻杆将特制膨胀管下入漏失层段，利用液压膨胀工具使膨胀管径向扩张，与井壁紧密贴合；同时管体自带的密封胶圈受压变形，实现环空密封。该技术无需水泥浆固化，可快速完成漏失层永久隔离，适用于深井、超深井的复杂漏失场景，且不影响后续储层开发。

3.4 堵漏效果评价方法

（1）实验室模拟评价：利用模拟装置复刻井下温度、压力与漏失通道条件，将堵漏材料注入模拟漏失地层，通过监测漏速变化、封堵层承压极限等参数，量化评价堵漏材料的封堵效率与稳定性；同时可通过改变温度、压力等变量，测试材料在不同工况下的适应性，为

现场施工提供参数依据。(2)现场验证指标:现场以堵漏前后的漏速差值与初始漏速的比值(漏速降低率)作为核心指标,若降低率 $\geq 90\%$ 则判定封堵有效;同时通过井口试压测试地层承压能力,对比堵漏前后的承压值差值(承压能力提升值),若提升值 $\geq 3\text{MPa}$,说明封堵层可满足后续钻井作业的压力要求,确保无复漏风险。

4 石油钻井工程中的智能监测与动态决策系统

4.1 随钻漏失监测技术

(1)环空压力波动分析(立管压力传感器数据):在钻井循环系统中安装高精度立管压力传感器,实时采集立管压力变化。当发生漏失时,环空流量减少导致压力下降,系统通过对比实时压力与正常工况下的压力曲线,识别压力异常波动(如压力骤降超过5%),并第一时间发出预警,为后续处理争取时间。(2)钻井液返出量实时监测(科里奥利流量计应用):在钻井液返出管线安装科里奥利流量计,精准测量返出流量。正常钻进时,钻井液注入量与返出量基本平衡;若出现漏失,返出量会显著低于注入量,当差值超过 $0.5\text{m}^3/\text{h}$ 时,系统自动触发漏失警报,同时记录漏失起始时间与漏速变化趋势,为漏失分级提供数据支撑。

4.2 智能决策支持系统

(1)基于数字孪生的漏失场景模拟:建立与实际钻井工程一致的数字孪生模型,将随钻监测获取的漏失参数(漏速、压力、地层岩性)输入模型,模拟不同堵漏方案(如桥接堵漏、凝胶堵漏)的实施效果,预测封堵成功率与潜在风险,辅助技术人员选择最优方案。(2)专家知识库与案例推理(CBR)决策模型:整合历史漏失处理案例与专家经验构建知识库,当发生新漏失时,CBR模型通过对比当前漏失特征(漏失量、地层条件)与知识库中相似案例,快速匹配最优处理方案,并结合

实时监测数据动态调整参数,提升决策效率与准确性。

4.3 应急响应机制

(1)漏失预警阈值设定:根据不同井段地层特性与钻井工况,设定差异化预警阈值,如浅部疏松地层漏速预警阈值设为 $3\text{m}^3/\text{h}$,深部致密地层设为 $1\text{m}^3/\text{h}$,压力波动预警阈值根据正常压力范围上下浮动8%设定,避免误报与漏报。(2)堵漏材料快速选配系统:建立堵漏材料数据库,存储各类材料(如桥接颗粒、凝胶、水泥浆)的适用场景与性能参数,系统根据漏失分级与地层条件,自动推荐适配的材料类型与用量,并联动现场仓储系统,快速调配材料,缩短处置准备时间。

结束语

石油钻井工程中,防漏堵漏技术的持续创新与实践应用,是保障钻井安全、提升作业效率的核心环节。通过深入解析漏失机理、构建风险评估模型,结合新型防漏材料的研发与智能监测系统的集成,行业已逐步实现从被动应对到主动防控的转变。未来,随着材料科学、人工智能与工程技术的深度融合,防漏堵漏技术将向更精准、更高效、更环保的方向发展,为复杂地质条件下的钻井作业提供更强有力的技术支撑。

参考文献

- [1]蒋红宗.防漏堵漏技术在石油钻井工程中的应用[J].化工管理,2022,(12):157-159.
- [2]刘国卫.浅析石油钻井工程防漏堵漏技术研究[J].西部探矿工程,2021,(08):90-91.
- [3]余定泽.石油钻井工程中防漏堵漏工艺的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2023,(09):82-83.
- [4]张鹏.钻井液堵漏材料与防漏堵漏技术[J].中国石油和化工标准与质量,2023,(15):164-166.