

石油钻井工程堵漏工艺探究

任庆访

中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司 四川 成都 610000

摘要：石油钻井中井漏问题影响钻井安全与成本。本文分析孔隙型、裂缝型、溶洞型漏失及按漏失速率分类的特征，阐述桥接、化学、高失水等堵漏工艺特点，探讨地质、漏失特性、施工材料等因素对工艺适用性的影响，提出工艺选择的综合评估体系、组合应用策略及实施后的效果监测与优化措施，为石油钻井堵漏提供技术参考。

关键词：石油钻井；井漏类型；堵漏工艺；适用性因素；应用策略

引言：石油钻井工程中，井漏是常见且危害较大的问题，会导致钻井液大量消耗、钻井周期延长，甚至引发井下复杂事故，严重影响钻井安全与经济效益。不同类型的井漏，其漏失通道和速率差异显著，对堵漏工艺的要求也各不相同。深入研究石油钻井工程堵漏工艺，准确分析井漏类型及特征，合理选择与应用堵漏工艺，对保障钻井作业顺利进行意义重大。

1 石油钻井井漏类型及特征分析

1.1 按漏失通道分类

孔隙型漏失的通道特点为漏层由分散微小孔隙构成，这类孔隙多源于岩石原生孔隙或沉积过程中形成的次生孔隙，通道尺寸较小且分布相对均匀^[1]。漏失速率特征表现为漏失量平缓，通常无突发性大量漏失，钻井液以缓慢渗透方式进入漏层，钻井过程中易出现钻井液池液面缓慢下降，对钻井作业干扰温和，但长期漏失仍会增加钻井液消耗成本。裂缝型漏失的裂缝形态差异显著，部分为岩石受力形成的天然裂缝，宽度从微米级到毫米级不等，走向与延伸长度各不相同；另有部分为钻井机械作用诱发的人工裂缝，形态相对规则但稳定性较差。漏失程度主要取决于裂缝宽度与延伸范围，窄缝漏失速率较慢，宽缝或多裂缝连通时漏失速率显著提升，可能导致钻井液快速流失，甚至引发井下压力失衡。溶洞型漏失的空间结构以岩石中溶洞为核心，溶洞体积差异大，小则数十立方厘米，大则形成连通性溶洞系统，部分溶洞内有充填物但仍具备漏失通道功能。漏失风险等级最高，钻井过程中钻遇溶洞时，钻井液会迅速涌入溶洞，漏失速率快且漏失量极大，短时间内可能导致钻井液断流，处理不及时易引发卡钻、井塌等严重井下事故，对钻井安全构成重大威胁。

1.2 按漏失速率分类

轻微漏失表现为钻井液漏失量较小，钻井液池液面下降速度缓慢，通常每小时漏失量低于一定范围，钻井

过程中无需频繁补充钻井液即可维持正常循环。对施工影响程度低，不会显著干扰钻井进度，仅需加强监测并适当调整钻井液性能，即可控制漏失情况避免加剧。中度漏失的判断依据为钻井液漏失量明显增加，钻井液池液面下降速度加快，需定期补充钻井液才能维持循环，部分情况下伴随钻井参数轻微波动，如泵压小幅下降。施工应对难点在于漏失通道难以精准判断，单一堵漏措施可能无法有效封堵，需结合漏层特征尝试多种堵漏方案，过程中易延误钻井工期并增加施工成本。严重漏失的典型特征为钻井液漏失量极大，钻井液池液面快速下降甚至断流，泵压急剧下降或归零，钻井循环系统无法正常工作。紧急处理必要性极高，不立即采取强效堵漏措施会导致井下压力失衡，引发井壁坍塌、钻具卡埋等恶性事故，不仅造成巨大经济损失，还可能威胁现场作业人员安全，必须第一时间启动应急堵漏程序控制漏失风险。

2 石油钻井工程主流堵漏工艺类型及核心特点

2.1 桥接堵漏工艺

桥接堵漏工艺的技术原理围绕桥接材料颗粒级配与漏失通道封堵机制展开，通过筛选不同粒径的桥接材料进行搭配，使小颗粒能填充漏失通道内的微小缝隙，大颗粒在通道入口或内部形成支撑骨架，逐步堆积形成连续致密的封堵屏障，阻断钻井液漏失路径。材料特性方面，桥接剂类型包括植物类颗粒和矿物类颗粒，植物类颗粒如核桃壳、花生壳，矿物类颗粒如石英砂、碳酸钙，各类桥接剂需具备良好物理化学稳定性，能承受井下温度与压力变化，且不与钻井液发生有害反应，确保封堵过程中保持形态与强度稳定。适用漏失类型以孔隙型漏失和中小裂缝漏失为主，施工条件需保证钻井液循环系统正常运行，能将桥接材料均匀输送至漏层，且漏层通道尺寸与桥接材料颗粒级配相匹配。

2.2 化学堵漏工艺

化学堵漏工艺的技术原理依赖化学试剂反应固化与通道填充机制,将特定化学药剂注入漏层后,药剂在井下温度、压力作用下发生聚合、交联等化学反应,逐渐固化形成具有一定强度的固体或凝胶状物质,填满漏失通道并与通道壁紧密结合,实现长效封堵。材料特性上,化学堵漏材料需精准控制固化时间,确保药剂有充足时间输送至漏层深处再完成固化,同时具备优良耐高温耐压性能,能在不同井下环境中保持固化体稳定性,避免因环境因素导致封堵失效^[2]。适用漏失场景涵盖裂缝型漏失与小型溶洞漏失,工艺优势在于封堵密封性强,固化体可深入通道内部,对复杂形态漏失通道适应性较好,能解决部分桥接堵漏难以处理的漏失问题。

2.3 高失水堵漏工艺

高失水堵漏工艺的技术原理聚焦钻井液高失水形成封堵层的过程,向钻井液中添加高失水控制剂后,当钻井液接触漏层时,水分快速渗透进入漏层岩石孔隙,钻井液中的固相颗粒在漏层表面迅速堆积,形成一层致密的泥饼封堵层,阻止后续钻井液继续漏失。工艺特点表现为封堵速度快,钻井液接触漏层后短时间内即可形成初步封堵层,且封堵层具备一定强度,能承受一定钻井液压力,但封堵层厚度较薄,主要依托漏层表面泥饼发挥作用。适配漏失条件以孔隙型漏失和窄裂缝漏失为主,应用限制在于对大裂缝漏失或溶洞型漏失封堵效果有限,且需控制钻井液失水速率,避免失水过快导致钻井液稠化,影响循环性能。

2.4 其他典型堵漏工艺

凝胶堵漏工艺的材料形态多为液态溶胶,注入漏层后可随漏失通道流动,在特定条件下逐渐转变为凝胶状物质。凝胶具备良好黏附性与可塑性,能填充不规则漏失通道,封堵适应性较强,尤其适用于裂缝型漏失与小型溶洞漏失,可在通道内形成柔性封堵结构,耐受一定程度地层变形。泡沫堵漏工艺的流体特性表现为密度低、流动性好,注入后能在漏层内快速扩散,填充较大空间,且泡沫具有一定稳定性,不易快速破裂。低压漏失适配性突出,适用于低压、易漏失地层的堵漏作业,能在不破坏地层压力平衡的前提下实现封堵,但对高温高压环境适应性较差,易因泡沫破裂导致封堵失效。

3 影响堵漏工艺适用性的关键因素

3.1 地质条件因素

地层岩性通过孔隙度和裂缝发育程度影响工艺选择,孔隙度高的地层漏失通道以微小孔隙为主,更适合采用能通过颗粒堆积形成封堵层的工艺;裂缝发育程度高且裂缝连通性强的地层,需选择可深入裂缝内部形成

有效封堵的技术。地层压力的压力梯度需与堵漏材料承压能力相匹配,压力梯度大的地层对材料强度要求更高,若材料承压能力不足,易导致封堵层被地层压力突破,无法实现有效堵漏。地层温度对堵漏材料性能影响显著,高温环境可能加速化学堵漏材料的反应速率,导致材料提前固化无法输送至漏层,或使部分高分子材料发生降解,降低封堵效果,因此需选用耐高温性能适配的工艺类型。

3.2 井漏自身特性因素

漏失通道类型与尺寸决定对堵漏材料粒径和形态的要求,孔隙型通道需搭配细粒径材料才能填充微小孔隙,裂缝型或溶洞型通道则需根据通道宽度选择适配粒径的材料,部分不规则通道还需可变形的凝胶类或泡沫类材料才能实现全面封堵。漏失通道的隐蔽性可能增加工艺适配难度,需结合前期勘察数据提升判断准确性^[3]。漏失速率差异需与工艺封堵效率相适配,轻微漏失速率较慢,可采用封堵速度相对平缓的工艺;严重漏失速率快,若选用封堵效率低的工艺,会导致钻井液持续大量漏失,加剧井下风险,因此需选择能快速形成封堵屏障的技术。

3.3 施工与材料因素

施工设备条件中的设备精度直接影响工艺实施效果,高精度的泵送设备能精准控制堵漏材料的注入压力和注入量,确保材料均匀输送至漏层并形成稳定封堵层;设备精度不足可能导致材料注入量不均,部分区域材料堆积过多,部分漏层区域材料不足,影响封堵质量。设备日常维护状况也会影响施工稳定性,需定期检修保障设备性能。材料供应与性能稳定性同样关键,材料获取便利性能保障施工过程中材料持续供应,避免因材料短缺导致施工中断;材料性能一致性可确保不同批次材料的封堵效果稳定,避免因材料性能波动导致工艺失效,影响堵漏作业进度。

3.4 经济与效率因素

工艺建设成本包含材料采购和设备投入等相关支出,不同堵漏工艺的材料价格和所需设备成本差异较大,在满足堵漏需求的前提下,需综合评估各类工艺的建设成本,选择性价比更高的方案。同时需考量长期维护成本,避免前期低成本选择导致后续支出增加。施工效率需与钻井工程整体进度相协调,部分工艺施工流程复杂、耗时较长,若在钻井关键阶段使用,可能延误整体工期;尤其在紧急漏失场景中,施工效率直接关系井下安全,需选择能快速完成堵漏作业的工艺,减少对钻井工程的影响。

4 石油钻井工程堵漏工艺的选择与应用策略

4.1 工艺选择的综合评估体系

评估指标设定需覆盖地质、漏失、施工、经济多个维度。地质维度指标包含地层岩性的孔隙度与裂缝发育程度、地层压力梯度、地层温度，这些指标直接决定堵漏材料的性能适配方向；漏失维度指标聚焦漏失通道类型与尺寸、漏失速率，为工艺封堵效率与材料形态选择提供依据；施工维度指标关注施工设备精度、材料供应稳定性，确保工艺具备实际实施条件；经济维度指标涵盖工艺建设成本、后续维护支出，保障选型方案的经济可行性。评估流程需按规范步骤推进。前期调研阶段需通过地质勘察、钻井参数分析等方式，收集地层数据、漏失特征、设备状况及成本预算等基础信息，确保数据全面准确；指标分析阶段需对收集的指标进行量化处理，例如将漏失速率划分为不同等级，对比各类工艺与指标的适配程度；工艺匹配阶段需结合指标分析结果，对候选工艺的适用性进行逐一验证，筛选出同时满足地质适配、漏失控制、施工可行与经济合理的最优工艺。

4.2 工艺组合应用策略

组合应用逻辑源于单一工艺的局限性，单一工艺往往难以应对复杂漏失场景，例如桥接堵漏工艺对微小孔隙封堵效果好但对大裂缝适配性不足，化学堵漏工艺密封性强但施工周期较长，通过多工艺组合可实现优势互补，提升整体封堵效果。典型组合模式中，桥接与化学堵漏的协同应用场景较为常见，先采用桥接材料在漏失通道内形成初步支撑骨架，缩小通道尺寸，再注入化学药剂，利用药剂固化特性填充骨架间隙，形成致密封堵层，这种组合既解决桥接工艺封堵不彻底的问题，又缩短化学工艺的施工时间。此外，高失水堵漏与凝胶堵漏的组合适用于孔隙-裂缝复合漏失地层，高失水材料快速形成表面封堵层，凝胶材料深入裂缝内部填充，实现双重防护。

4.3 堵漏工艺实施后的效果监测与优化

监测内容需全面覆盖堵漏效果与井筒状态。漏失量变化监测通过钻井液池液面高度、循环流量对比，判断漏失是否得到控制；封堵层稳定性监测关注井筒压力是否稳定、有无异常压力波动，避免封堵层破裂导致漏失复发；井筒压力状态监测通过压力传感器实时采集数据，确保井筒压力与地层压力平衡，防止引发井喷、井塌等风险。监测方法需结合传统手段与先进技术。压力监测通过井下压力传感器获取实时压力数据，分析封堵层承压能力；流量监测借助流量计记录钻井液循环流量，对比进出流量差异判断漏失情况；井筒成像技术通过井下摄像头或超声波探测设备，直观观察封堵层完整性与漏失通道填充状态，精准定位潜在问题。优化措施需基于监测结果制定。若监测发现漏失量仍超标，可调整工艺参数，例如增加桥接材料的粒径配比、优化化学药剂的固化时间；若封堵层稳定性不足，需改进材料性能，如增强材料耐高温耐压性、提升材料与地层的黏结强度；若施工效率较低，可优化施工流程，减少材料混合与注入的耗时，确保工艺持续适配井下实际情况。

结束语

石油钻井工程堵漏工艺的选择与应用需综合考虑多方面因素。通过对井漏类型及特征的精准分析，结合地质、漏失特性、施工材料等条件，运用综合评估体系选择合适工艺，采用组合应用策略提升封堵效果，并加强实施后的效果监测与优化，能有效解决井漏问题，提高钻井效率与安全性，推动石油钻井技术不断进步，为石油工业的稳定发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]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.
- [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]扶喆一.石油钻井工程防漏堵漏工艺质量标准探析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(21):1-3.