

石油钻井工程中防漏堵漏工艺研究

汪松柏

中国石油化工股份有限公司河南油田分公司石油工程技术研究院 河南 南阳 473043

摘 要：井漏是石油钻井作业中高频多发的井下复杂故障，受地层地质特性与现场施工扰动双重影响，易引发井壁坍塌、卡钻及井报废等安全风险与经济损失。本文系统剖析钻井井漏的核心产生机理，明确井筒压差与地层漏失通道发育情况为主要控制因素，梳理地质原生缺陷与施工次生扰动两类诱发机制。同时分类阐述钻井液优化、施工参数调控、井壁预处理及分段分层防控四大核心防漏工艺，以及随钻堵漏、桥塞堵漏、固化堵漏、负压堵漏四种差异化堵漏技术。研究贴合不同地层与漏失工况特征，构建了分级防控、精准处置的井漏治理技术体系，可为现场钻井井漏防控作业提供系统化技术参考。

关键词：石油钻井；井漏问题；防漏工艺；堵漏工艺；井下施工

引言：石油钻井工程属于高风险、高复杂度的地下作业项目，井下复杂工况的精准防控是保障钻井安全、提升施工效率、控制工程成本的核心关键。井漏作为钻井过程中最常见的井下故障，普遍存在于疏松地层、破碎构造带及碳酸盐岩溶洞地层中，兼具地质诱发与施工诱导的双重属性。随着油气勘探开发逐步向深层、复杂地层推进，地层非均质性显著增强，漏失通道类型更复杂、井漏风险等级大幅提升，传统单一防控工艺适配性不足、治理效果有限。为高效解决复杂地层井漏难题，规避井漏引发的各类次生灾害，完善钻井井漏防控技术体系，本文深入探究井漏产生机理与危害，系统梳理适配不同工况的防漏、堵漏核心工艺，为复杂地层钻井作业安全筑牢技术支撑。

1 钻井井漏产生机理及主要危害

钻井井漏的本质是钻井液在井筒压力驱动下，通过地层固有或施工诱发的孔隙、裂缝、溶洞等漏失通道，向地层内部发生渗漏、流失的井下复杂工况，其产生核心取决于井筒液柱压力与地层孔隙压力的差值、地层漏失通道的发育程度两大核心控制因素，是石油钻井作业中发生率最高的井下复杂问题之一。（1）当井筒内钻井液液柱压力大于对应深度的地层孔隙压力时，正向压差会持续推动钻井液向地层孔隙、裂缝等空隙结构渗透，若地层内部通道连通性较好、储集空间规模达标，就会形成不同速率、不同量级的井漏问题。从地质成因层面来看，疏松砂岩地层的高孔隙度特性、构造破碎带的多尺度裂缝发育特性、碳酸盐岩地层的大型溶洞结构，是天然存在的井漏诱发条件；从施工诱导层面来看，钻井过程中的机械振动、钻具往复冲击、井筒内压力波动等动态因素，会诱发地层产生新的微小裂缝，同时扩张原

有闭合的弱胶结通道，进一步扩大漏失空间，加剧井漏的发生概率与严重程度。（2）井漏问题会对石油钻井全流程作业造成多重负面影响。首先，钻井液持续漏失会直接导致井筒内液柱高度下降，原有压力平衡状态被打破，极易引发井壁失稳坍塌、高压地层流体侵入井筒等次生问题，造成井下作业工况持续恶化。其次，钻井液的大量非生产性损耗需要现场持续补充配置新浆液，直接增加钻井材料消耗与辅助作业工序，拉低整体钻井施工效率，延长钻井周期。同时，严重的恶性井漏会导致井下压力环境长期处于不稳定状态，大幅提升卡钻、埋钻等井下设备故障的发生概率，额外增加井下作业安全隐患，直接破坏钻井作业的连续性与施工稳定性，极端情况下甚至会导致整口井报废，造成重大经济损失^[1]。

2 石油钻井工程核心防漏工艺

2.1 钻井液性能优化防漏工艺

钻井液是石油钻井过程中平衡井筒压力、防护井壁稳定的核心循环介质，其黏度、密度、滤失量、流变特性等关键参数，直接决定全流程的主动防漏效果。（1）该工艺通过针对性调整钻井液基础配方与性能参数，降低钻井液的无效渗透性与流动损耗，提前封堵地层表层微小孔隙，从源头抑制钻井液向地层内部的漏失趋势。（2）在疏松、高渗透地层开展施工作业时，可通过定量添加膨润土、聚合物增稠剂等处理剂，精准提升钻井液的体系黏度与胶体稳定性，大幅降低钻井液向地层孔隙的渗透能力，避免浆液持续渗入地层微米级微小通道。（3）在裂缝发育地层施工时，可在钻井液体系中复配加入超细碳酸钙、改性木质素等惰性刚性封堵材料，提前填充地层表层的微小缝隙，在井壁位置快速形成致密的低渗透滤饼，阻断钻井液向深部延伸的潜在漏失通道。

同时严格管控钻井液密度阈值,在完全满足地层压力平衡的前置条件下,尽可能缩小液柱压力与地层孔隙压力的正向差值,减少压力驱动作用造成的钻井液漏失,实现近平衡状态下的低压主动防漏施工效果^[2]。

2.2 钻井施工参数调控防漏工艺

钻井施工过程中的钻压、转速、泵量等核心作业参数,会直接影响井下动态压力波动幅度与地层原生结构稳定性,参数设置不合理是现场施工诱发人为井漏的重要可控原因。(1)该工艺的核心逻辑是根据不同井段的地层地质特性,动态匹配最优施工参数组合,最大限度降低施工扰动对地层原生结构的破坏。(2)在破碎地层、裂隙高度发育的风险井段开展钻井作业时,采用低钻压、低转速、低泵量的平稳钻进模式,降低钻具对井壁的持续冲击与往复摩擦,避免机械作用力扩张原有地层裂缝、诱发产生新的次生漏失通道。(3)同步优化钻井泵的启停与工况切换操作流程,规避泵压骤升骤降造成的井下压力剧烈波动,防止瞬时压力冲击破坏井壁已成型的致密滤饼,从操作层面消除井漏诱发条件。此外合理控制机械钻进速度,避免快速钻进导致井筒内钻井液循环通路不畅、环空压力局部异常积聚,保障全井段井下压力始终处于稳定可控区间,实现钻进全过程的主动防漏管控。

2.3 井壁预处理防漏工艺

针对地质条件复杂、井漏风险等级较高的目标地层,可在正式钻进作业启动前开展专项井壁预处理作业,提前封堵地层固有漏失通道,主动提升井壁整体致密性。(1)该工艺主要适配孔隙度高、微裂缝广泛发育的疏松地层与构造破碎带,施工核心是通过前置注入专用预处理浆液,对井筒周边一定范围内的地层缝隙进行填充固化。(2)预处理浆液采用低浓度、高渗透性的复合封堵体系,能够在低正向压差作用下快速渗入地层微米级微小孔隙与延伸性微裂缝,通过体系内组分的固化反应在井壁周边形成连续致密的封堵层。(3)该封堵层可同步实现井壁结构加固与漏失通道封闭双重效果,大幅缩小甚至完全封闭井筒周边的地层漏失空间,从根本上降低后续钻进过程中钻井液向地层渗漏的风险。该工艺可有效规避原生地质缺陷引发的持续性微漏失问题,减少后续钻进过程中的井下复杂工况,为后续长时间稳定钻井作业提供良好的井下基础条件。

2.4 分段分层防漏施工工艺

油气藏纵向地质结构存在显著非均质性,不同井段的地层孔隙度、裂缝发育程度、压力系统特性均存在明显差异,采用单一固定防漏工艺完全无法适配全井段

的差异化施工需求。分段分层防漏工艺以地层纵向分布实测特征为核心依据,对不同井段精准划分独立施工单元,针对性匹配专属防漏技术方案。(1)针对浅层未固结的疏松地层,防漏管控侧重优化钻井液体系黏度参数,提升胶体悬浮稳定性,降低钻井液向高渗透浅层孔隙的侵入速率,精准防控浅层原生孔隙型漏失。(2)针对中深层裂缝发育的破碎地层,防漏管控侧重在钻井液中复配不同粒径级配的刚性封堵材料,强化对不同尺度裂缝的填充封堵效果,提前阻断潜在的延伸型漏失通道。(3)针对高正向压差的深部地层,以精准调控钻井液密度为核心手段,实现井筒液柱压力与地层孔隙压力的近平衡匹配,规避过大压差驱动引发的诱发性漏失。通过差异化、分层化的全井段防漏管控模式,彻底解决统一防漏方案的适配性不足问题,大幅提升全井段整体防漏效果^[3]。

3 石油钻井工程核心堵漏工艺

3.1 随钻堵漏工艺

随钻堵漏属于动态轻量化堵漏工艺,适配轻微、微量的钻井液漏失工况,可在不中断正常钻井作业的前提下同步完成堵漏施工作业。(1)该工艺的核心原理是在循环的常规钻井液体系中添加适配性随钻堵漏剂,利用钻井液的正常循环通路,将分散均匀的堵漏材料持续携带至井下漏失位置,通过材料的逐级堆积、缝隙填充、界面吸附作用,封堵地层微小孔隙与细裂缝类漏失通道。(2)常用的随钻堵漏材料包含纤维类、刚性颗粒类、聚合物类复合组分,不同属性的材料可在漏失通道内相互配合,形成多级梯度封堵结构,适配不同尺度的微小漏失通道。(3)该工艺最核心的技术优势是无需停钻停工、不打断钻井施工连续性,现场操作流程简便、辅助作业耗时短,施工综合效率高,主要用于处置钻井过程中突发的轻微渗透性漏失、微裂缝漏失问题,是石油钻井作业中应用范围最广的常规基础性堵漏工艺^[4]。

3.2 桥塞堵漏工艺

桥塞堵漏工艺主要适配中度井漏工况,针对尺度较大的地层裂缝、高渗透孔隙型漏失通道,封堵效果长期稳定。其技术原理是将大颗粒、高强度的桥塞堵漏材料配置成高浓度堵漏浆液,通过钻井泵正循环输送至井下目标漏失层位,利用材料的逐级架桥、堆积、压实作用,在漏失通道入口位置形成高强度稳定封堵桥塞,彻底阻断钻井液向地层内部的持续漏失路径。(1)施工过程中,需提前根据漏失速率反推漏失通道的预估尺度,针对性匹配不同粒径区间的刚性颗粒、柔性纤维、片状封堵材料,实现粗细搭配的层级封堵结构。其中刚性颗

粒主要起到骨架支撑作用,搭建封堵层的基础受力结构;柔性材料充分填充颗粒之间的间隙,提升封堵层的整体致密性与密封性能;片状材料覆盖漏失通道表层,防止后续循环作业中封堵结构被高速钻井液冲刷破坏。

(2)该工艺成型封堵体的承压强度高、长期稳定性好,能够有效处置常规尺度裂缝、大孔隙地层引发的中度井漏,是现场中度漏失处置的核心常用工艺。

3.3 固化堵漏工艺

固化堵漏工艺属于高强度堵漏技术范畴,主要适配严重井漏、大型裂缝及小型溶洞类漏失工况,封堵完成后形成的结构长期稳定性极强。(1)该工艺采用可发生固化反应的复合堵漏浆液,核心体系主要分为水泥基、聚合物固化基两类,浆液通过井筒输送至目标漏失层位后,经过预设时长的静置反应,可自主凝固、硬化,最终形成高强度、高致密性的实体封堵层,彻底封闭大尺度漏失通道。(2)其中水泥基固化堵漏浆液固化后整体强度高、材料成本低,适用于常规大型连通漏失通道的封堵作业;聚合物固化浆液的固化速度可精准调控,成型后密封性能更优异,适配形态复杂不规则的特殊漏失通道。(3)现场施工全过程需精准控制浆液配比、固化触发时间、浆液总注入量三类核心参数,确保浆液完全填充目标漏失通道,避免封堵结构内部出现空洞、残留缝隙,保障最终封堵效果,有效解决常规工艺难以处置的重度井漏、反复复漏问题。

3.4 负压堵漏工艺

负压堵漏工艺是专门适配复杂井下漏失工况的特殊堵漏技术,主要针对常规正压堵漏工艺难以有效处置的低压漏失、空洞型漏失问题。(1)该工艺通过配套设备调整井筒内的动态压力状态,人为制造井筒低于地层孔隙压力的负压环境,打破原有漏失通道的压力平衡状态,使配置完成的堵漏浆液在负压差作用下主动渗入地层深部的漏失通道,实现全方位、深层次的封堵作业。

(2)相较于常规正压堵漏工艺,负压堵漏能够完全避免高压浆液注入过程中冲击扩张原有漏失通道的问题,可

精准填充常规工艺难以触及的地层深部延伸裂缝、溶洞空洞,从根源上解决仅完成表层封堵、深部持续发生隐性漏失的行业难题。(3)该工艺的现场施工核心是精准调控井筒负压的数值区间,同步匹配适配流动性的专用堵漏浆液,保障浆液在负压驱动下充分渗透、在漏失通道内均匀堆积,最终形成从地层深部到井壁表层的连续完整封堵体系,大幅提升常规工艺处置效果较差的复杂漏失工况的整体堵漏成功率^[5]。

结束语

本文系统完成了钻井井漏机理、危害及全套防堵漏工艺的梳理分析,明确了压差失衡与漏失通道发育是井漏发生的核心本质,厘清了地质因素与施工因素的致漏逻辑。通过分类整合主动防漏与被动堵漏技术,形成了适配浅层疏松地层、中深层破碎裂缝地层、深部高压差地层的差异化防控方案,可精准应对微量、中度、重度及复杂特殊井漏工况。各类防堵漏工艺优势互补、适配性各异,能够有效解决单一工艺防控局限性强的行业痛点,全方位提升井下井漏风险管控能力。实际钻井施工中,需结合目标井段地质特征、漏失量级动态匹配工艺方案,精准调控施工参数与材料配比,从源头规避井漏风险、高效处置漏失故障,有效降低井下安全隐患与施工成本,为油气钻井工程安全稳定施工筑牢技术基础。

参考文献

- [1]高振华.石油钻井工程中防漏堵漏工艺研究[J].现代工程科技,2025,4(7):137-140.
- [2]解健程.防漏堵漏技术在石油钻井工程中的应用研究[J].化工管理,2025(15):158-160.
- [3]李军民,韩强,边世德.石油钻井工程中防漏堵漏工艺的应用[J].石化技术,2025,32(3):150-152.
- [4]刘海鹏.试论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,2025,45(9):148-150.
- [5]马少荣.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,2025,45(10):164-166.