

石油钻井过程中井漏问题成因及防治技术研究

崔香明

中石化西南石油工程有限公司重庆钻井分公司, 重庆 400042

DOI:10.61369/ERA.2026060008

摘 要 : 井漏是石油钻井施工中常见且危害突出的井下复杂问题, 不仅会造成钻井液大量流失、延误施工周期, 还易诱发井塌、井喷等安全事故, 严重影响钻井效率与作业安全。本文围绕石油钻井井漏问题, 系统分析其主要成因, 将井漏诱因划分为地质因素、工程与工艺因素及其他诱导因素三类, 其中地质因素为井漏发生的根本原因, 主要受地层孔隙、裂缝、溶洞及地层压力分布控制, 工程与工艺因素是主要诱发因素, 涉及钻井液性能、施工参数、操作规范等多个方面, 自然环境与人为误操作等外部因素则会加剧突发性井漏风险。在此基础上, 从钻前预防、随钻预防及降低激动压力等维度梳理井漏预防技术, 构建源头防控与实时调控相结合的预防体系; 同时针对不同漏失程度与地层类型, 介绍常规堵漏、化学与固结堵漏、特殊地层专项处理及新型堵漏材料与技术等治理手段, 形成覆盖预防与治理的井漏综合防控技术体系。研究可为复杂地层钻井井漏防治提供技术参考, 对提升钻井施工安全性、降低井下复杂风险具有重要意义。

关 键 词 : 石油钻井; 井漏; 漏失成因; 地质因素

Research on the Causes and Prevention and Control Technologies of Well Leakage During Oil Drilling

Cui Xiangming

Chongqing Drilling Branch of Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Chongqing 400042

Abstract : Well leakage is a common and hazardous downhole complication encountered during oil drilling operations. It not only leads to significant loss of drilling fluid and delays in construction schedules but also easily triggers safety incidents such as well collapse and blowout, seriously affecting drilling efficiency and operational safety. This paper focuses on the issue of well leakage in oil drilling, systematically analyzing its primary causes. The incentives for well leakage are categorized into three types: geological factors, engineering and technological factors, and other inducing factors. Among these, geological factors are the fundamental cause of well leakage, primarily governed by formation porosity, fractures, caves, and formation pressure distribution. Engineering and technological factors are the main inducing factors, involving various aspects such as drilling fluid properties, operational parameters, and operating procedures. External factors such as natural environmental conditions and human misoperations can exacerbate the risk of sudden well leakage. Building on this analysis, the paper outlines well leakage prevention technologies from dimensions such as pre-drilling prevention, prevention during drilling, and reduction of surge pressure, establishing a prevention system that combines source control with real-time regulation. Additionally, it introduces treatment methods tailored to different leakage severities and formation types, including conventional plugging, chemical and consolidation plugging, specialized treatments for specific formations, and novel plugging materials and technologies, thereby forming a comprehensive prevention and control technology system for well leakage that covers both prevention and treatment. This research provides technical references for preventing and controlling well leakage during drilling in complex formations and is of great significance for enhancing drilling safety and reducing downhole complications.

Keywords : oil drilling; well leakage; causes of leakage; geological factors

引言

随着石油勘探开发向深井、超深井、复杂地层延伸, 地层岩性、压力分布愈发复杂, 裂缝型、溶洞型等易漏地层出现频率显著增加, 井漏问题的发生概率、漏失程度及治理难度也随之提升, 传统防治技术已难以满足复杂工况下的井漏防控需求, 井漏问题已成为制

约石油钻井工程高效、安全开展的核心瓶颈之一。因此，系统剖析井漏问题的发生成因，明确各类诱因的作用机制，探索科学、高效、适配不同地层条件的防治技术，构建完善的井漏综合防控体系，对降低井漏发生率、减少漏失损失、保障钻井作业安全具有重要的理论价值与工程实践意义。基于此，本文结合现有研究成果与工程实践经验，系统分析石油钻井过程中井漏问题的主要成因，分类梳理针对性的预防与治理技术，重点探讨新型堵漏材料与技术的应用优势，为石油钻井工程中井漏问题的科学防控提供技术支撑与参考，助力钻井工程向高效、安全、低成本方向发展。

一、井漏成因分析

（一）地质因素分析

地质因素是井漏发生的根本原因，主要由地层孔隙度、渗透率、裂缝发育程度及地层压力等固有特性决定，难以通过工程手段彻底改变，是井漏防控的核心关注点。井漏主要发生在三类地层，裂缝型地层（含天然裂缝与诱导裂缝），天然裂缝多发育于碳酸盐岩、页岩等岩层，裂缝规模、连通性直接影响漏失程度，诱导裂缝则由钻井液柱压力超地层破裂压力产生；孔隙型地层多见于疏松砂岩、砾岩，漏失初期较慢，随钻进会逐步加剧；溶洞型地层常见于碳酸盐岩，因溶蚀连通溶洞易造成钻井液瞬间大量流失，漏失危险且难控。此外，地层压力偏低或分布不均，形成压力差或匹配困难，也会显著提升井漏风险。

（二）工程与工艺因素分析

除了地质原因引起井漏之外，钻井作业中的设计、材料或施工等方面的工程原因也不可忽视，如压力控制不当、井眼稳定性差、钻井速度过快、未及时固井、井眼轨迹设计不合理、钻井液体系选择不当、堵漏材料不合适等原因也会导致或者加重钻井液的漏失^[1]。工程与工艺是井漏的主要诱因，核心与钻井施工技术、操作相关，可通过优化工艺、规范操作防控。钻井液性能不合理直接增大漏失风险，密度过高易压裂地层，粘度、切力过低会导致滤饼质量差无法封堵孔隙裂缝，失水量过大则易造成滤饼脱落。钻井工艺不当同样诱发漏失，钻速过快影响井壁稳定，井眼轨迹不合理会冲刷破坏井壁，固井时水泥浆密度过高、顶替速度过快易超地层破裂压力。施工操作不规范也是重要原因，起下钻过快产生过大压力，易破坏滤饼或压裂地层；液位监控不及时，轻微漏失易发展为严重井漏。

（三）其他诱导因素

除地质因素、工程与工艺因素外，一些外部诱导因素也会增加井漏风险，主要包括自然环境因素与人为因素，此类因素多为偶然发生，但易引发突发性井漏^[2]。自然环境因素方面，钻井区域发生地震、暴雨、山洪等自然灾害时，会导致地层应力重新分布，诱发地层裂缝发育，破坏井壁稳定性，引发井漏，此外，地下水位变化过大，会导致地层压力波动，打破钻井液液柱压力与地层压力的平衡，诱发漏失；人为诱导因素则主要体现在钻井施工的各类不当操作中，钻井过程中，误操作导致钻井工具碰撞井壁，会破坏井壁完整性，引发漏失，相邻井施工时，钻井液窜入本井地层，会导致地层压力异常，进而诱发漏失，同时，钻井过程中违规加入化学药剂，会破坏钻井液性能，导致滤饼质量下

降，引发渗漏。

二、井漏预防技术

（一）钻前预防措施

钻前预防是井漏防控的核心，关键在于前期勘察与方案优化，从源头降低漏失风险^[3]。通过地震勘探、测井及资料分析，精准掌握地层岩性、裂缝、压力等参数，明确漏失层位与风险等级，绘制地质风险分布图。在此基础上优化井身结构，合理下入套管隔离易漏地层；优选钻井液性能，提前配置防漏体系；科学确定钻井、起下钻等施工参数，避免工艺不当引发漏失。同时备足防漏堵漏材料，检查设备运行状态，开展人员操作与应急培训，为后续钻井提供安全保障。

（二）随钻预防技术

随钻预防是井漏防控的核心，关键在于施工中实时监测、动态调控，早发现、早处置，防止漏失扩大^[4]。施工时需重点监测泥浆罐液位、循环流量、钻井液性能等参数，及时判识漏失情况；根据地层变化动态优化钻井液性能，合理调整密度、粘度、切力及失水量，提升封堵能力并保持压力平衡；规范钻井、起下钻操作，控制速度，避免激动压力、抽吸压力及井壁损伤，维持井内压力稳定；对易漏、疑似漏失地层提前加入桥接、封堵材料进行预处理，必要时采用分段钻井、分段封堵，从源头防控井漏。

（三）降低激动压力的技术措施

激动压力是诱发井漏的重要因素之一，主要产生于起下钻、钻井过程中，当激动压力超过地层破裂压力时，会诱发地层裂缝，引发漏失^[5]。因此，降低激动压力是井漏预防的重要手段，核心是通过优化操作、改进技术，减少压力波动。起下钻速度过快是产生激动压力、抽吸压力的主要原因，因此需严格控制起下钻速度，根据井深、井径、钻井液性能等参数，确定合理的起下钻速度，避免速度突变^[6]。起钻时采用分段起钻、中途循环的方式，及时补充钻井液，维持井内液柱压力稳定，减少抽吸压力，下钻时则控制下钻速度均匀，避免钻井液被快速挤压，产生过大的激动压力^[7]。同时要优化钻井液流变性能，钻井液的流变性能直接影响激动压力的大小，可通过调整钻井液的粘度、切力，改善钻井液的流动特性，减少钻井液在井内流动时的压力损失，降低激动压力，同时控制钻井液的固相含量，避免固相颗粒过多导致钻井液流动阻力增大，加剧压力波动^[8]。此外还需改进钻井工艺，采用定向钻井、水平钻井等先进工艺，优化井眼轨迹，减少井壁阻力，降低钻井液流动时的压力损失，钻井过程中采用低密度钻井

液体系，在保证井壁稳定的前提下，尽量降低钻井液液柱压力，减少激动压力与地层压力的差值。固井过程中则优化水泥浆性能与顶替工艺，控制顶替速度，减少环空压力波动，避免超过地层破裂压力。

三、井漏治理技术

（一）常规堵漏技术

常规堵漏技术适用于轻微至中度漏失，操作简单、成本低、见效快，核心是向钻井液中加入封堵材料，在漏失通道内形成封堵层。桥接堵漏技术（常规堵漏核心），适用于孔隙型、微小裂缝型漏失，向钻井液中加入石英砂、核桃壳等桥接剂，在压力差作用下桥联形成初步封堵层，再通过固相颗粒沉积形成致密滤饼，需匹配桥接剂粒径与漏失通道大小^[9]。高粘度泥浆堵漏技术，适用于轻微、渗漏型漏失，通过加入 CMC、黄原胶等增粘剂（或膨润土）提高钻井液粘度、切力及固相含量，减缓漏失并增强滤饼封堵能力。常规水泥浆堵漏技术，适用于中度、裂缝型漏失，将水泥浆注入漏失地层，凝固后形成坚硬封堵层实现永久堵漏，需根据地层深度、温度确定配方与凝固时间，控制注入速度与压力。

（二）化学堵漏与固结堵漏技术

化学堵漏与固结堵漏技术适用于中度至重度、复杂裂缝型漏失，核心是通过化学药剂反应形成高强度稳定封堵层，长效性优于常规技术^[10]。化学堵漏采用脲醛树脂、环氧树脂等封堵剂，流动性好，可渗透微小裂缝孔隙并固化，适用于微小裂缝、高渗透地层漏失，需按比例混合注入并根据漏失类型选剂。固结堵漏适用于严重裂缝、溶洞型漏失，注入固结剂（如水泥 - 水玻璃浆液），将地层岩石与封堵材料固结为整体，溶洞型漏失可先填骨料再注固结剂。复合化学堵漏结合多种封堵剂优势，适用于复杂漏失场景，可通过桥接剂 + 化学封堵剂、水泥浆 + 化学封堵剂等组合，实现快速长效堵漏。

（三）特殊地层井漏处理技术

溶洞型、高压裂缝型、易坍塌漏失地层的井漏，漏失量大、封堵难、易复发，需结合地层特性采用针对性技术。溶洞型地层，漏失量极大，采用填充 - 封堵结合技术，先填入碎石等骨料缩小漏失通道，再注入高强度水泥浆或化学固结剂固结；大型

溶洞分段处理，漏失量过大时先暂堵再永久封堵。高压裂缝型地层，漏失压力高、风险大，控压 - 封堵同步，调整钻井液密度控压防井喷，注入高强度封堵剂高压填充裂缝，实时监控并动态调整方案。易坍塌漏失地层：兼具漏失与坍塌风险，防塌 - 堵漏结合，优化钻井液并加防塌剂稳定井壁，用低粘度高滤失封堵剂形成滤饼封堵通道，控制施工速度，必要时分段施工。

（四）新型堵漏材料与技术介绍

随着石油钻井技术发展，新型堵漏材料与技术涌现，相比传统技术，具有封堵效率高、适应性强、环保便捷等优势，有效解决复杂地层井漏难题，推动防治技术升级。新型堵漏材料中，纳米封堵材料以纳米颗粒为核心，粒径小、吸附性强，可渗透微小裂缝形成致密高强度封堵层，适配微小裂缝、高渗透地层，环保且能减少漏失复发；可降解堵漏材料由天然高分子改性制成，可降解、不堵塞油气通道，适配油气开发后期井漏，流动性好、封堵快速；柔性封堵材料以高分子弹性体为核心，韧性佳、适配裂缝型、易变形地层，能适应地层变形，封堵效果稳定。新型堵漏技术方面，定向射孔堵漏技术可精准注入封堵剂，适配复杂裂缝、定向漏失地层，节省成本、提升效率；智能堵漏技术结合大数据、物联网，实时采集参数并智能调整方案，适配复杂多变井漏场景，可提前预警；泡沫堵漏技术以泡沫为载体，适配低压、高渗透、大裂缝地层，流动性好、成本低、环保无污染。

四、结束语

本文围绕石油钻井过程中井漏问题的成因及防治技术展开系统研究，结合现有研究成果与工程实践，全面剖析了井漏发生的地质因素、工程与工艺因素及其他外部诱导因素，明确了各类因素的作用机制，梳理了覆盖钻前、随钻及激动压力控制的全方位预防技术，分类总结了常规堵漏、化学与固结堵漏、特殊地层专项处理及新型堵漏材料与技术在内的治理方案，构建了成因识别 - 预防管控 - 精准治理的井漏综合防控思路。本文的研究成果可为石油钻井工程井漏防治提供理论参考与工程借鉴，助力钻井作业实现高效、安全、低成本推进，为石油勘探开发事业的持续发展提供支撑。

参考文献

- [1] 杜征鸿, 祁杰, 黄丹超, 等. 深井超深井井漏原因及堵漏技术综述 [J/OL]. 特种油气藏, 1-15[2026-03-20].<https://link.cnki.net/urlid/21.1357.TE.20250529.1722.004>.
- [2] 薛蓉静. 基于机器学习的井漏智能预警关键技术研究 [D]. 电子科技大学, 2025.DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2025.002877.
- [3] 陈昆鹏, 刘东鑫, 于庆川, 等. 渤中19-6油田井漏治理技术的优化及应用 [J]. 天津科技, 2025, 52(01): 83-86.DOI: 10.14099/j.cnki.tjkj.2025.01.009.
- [4] 何均宾, 柳明, 于学勇, 等. 威远区块基于地质工程一体化的井漏风险识别技术研究 [J]. 能源与环保, 2024, 46(10): 77-84+91.DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.10.013.
- [5] 周鹏高, 罗川, 徐智昶. 应用渗透率对比法随钻识别井漏类型 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(10): 50-53.
- [6] 白玉龙. 钻井工程中井漏预防措施探讨 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(08): 50-52.
- [7] 韩亮. 基于时序数据增强的井漏风险智能诊断方法 [D]. 中国石油大学 (北京), 2024.DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2024.001349.
- [8] 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.DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.2024.14.028.
- [9] 吕金帅, 李玉雄, 俞辉, 等. 钻井工程中井漏预防及堵漏技术 [J]. 自动化应用, 2024, 65(02): 126-128.DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.02.040.
- [10] 陈林, 陆海瑛, 王泽华, 等. 融合 LightGBM 和 SHAP 的井漏类型判断及主控因素分析 [J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(06): 771-777.