

# 深层地层钻井中卡钻事故成因机理 与高效解卡技术策略研究

宋俊杰

中海油服一体化和新能源事业部平台作业公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026060036

**摘 要 :** 深层地层钻井受高温、高压、复杂岩性及井眼轨迹多变等因素影响, 卡钻事故频发且处置难度大, 严重制约钻井安全与效率。本文系统剖析深层钻井四类典型卡钻事故的核心成因机理, 在此基础上梳理卡钻早期识别技术, 包括地面异常参数特征提取、LWD/MWD 随钻监测预警及大数据机器学习智能预警模型; 进而提出高效解卡技术体系, 明确不同卡钻类型的技术优选原则。研究可为深层钻井卡钻事故的机理认知、早期预警与快速高效处置提供理论依据与技术支持, 对降低复杂地层钻井风险、提升施工安全性与经济性具有重要意义。

**关 键 词 :** 深层地层钻井; 卡钻事故; 成因机理; 压差卡钻

## Research on the Causal Mechanism and Efficient Stuck Pipe Releasing Technical Strategies for Drilling in Deep Formations

Song Junjie

Platform Operation Company, Integrated and New Energy Business Division, China Oilfield  
Services Limited, Tianjin 300450

**Abstract :** Drilling in deep formations is subject to high temperatures, high pressures, complex lithologies, and variable wellbore trajectories, leading to frequent stuck pipe incidents that are difficult to manage and significantly hindering drilling safety and efficiency. This paper systematically analyzes the core causal mechanisms of four typical types of stuck pipe incidents in deep drilling. Based on this analysis, it outlines early identification techniques for stuck pipe incidents, including the extraction of abnormal surface parameter characteristics, Logging While Drilling (LWD)/Measurement While Drilling (MWD) monitoring and early warning, and intelligent early warning models based on big data machine learning. Furthermore, it proposes an efficient stuck pipe releasing technical system and clarifies the principles for selecting optimal techniques for different types of stuck pipe incidents. The research provides a theoretical basis and technical support for understanding the mechanisms, early warning, and rapid and efficient management of stuck pipe incidents in deep drilling, which is of great significance for reducing drilling risks in complex formations and enhancing construction safety and cost-effectiveness.

**Keywords :** deep formation drilling; stuck pipe incidents; causal mechanism; differential pressure sticking

### 引言

为破解深层钻井卡钻事故防控难题, 厘清各类卡钻事故的核心成因机理, 建立科学有效的早期识别、动态监测与高效解卡技术体系, 降低卡钻事故发生率与处置损失, 保障深层钻井作业安全高效推进, 本文系统剖析深层钻井中四类典型卡钻事故的成因机理, 梳理卡钻早期识别与动态监测技术, 提出针对性的高效解卡技术策略与优选方案, 结合相关工程实践与研究成果, 为深层钻井卡钻事故的机理认知、预警防控与快速处置提供理论依据与技术支持, 对推动深层油气资源高效勘探开发、突破深层钻井工程技术瓶颈具有重要的理论意义与工程应用价值。

## 一、深层钻井卡钻事故成因机理分析

### （一）压差卡钻的“力学－滤饼”耦合机理

压差卡钻是深层钻井最常见的卡钻类型之一，核心是力学与滤饼耦合作用使钻柱被井壁吸附卡滞。钻井液液柱压力与地层孔隙压力形成的压差，会把钻柱压向井壁并与井壁滤饼紧密贴合。滤饼会增大接触面积、增强吸附力，深层高温高压还会压实滤饼、劣化钻井液，让滤饼更厚更致密，大幅提升黏附阻力。井斜角、狗腿度增大会加长接触长度、加大接触力，钻柱静止时间过长也会持续增强吸附作用。当吸附力超过钻柱活动能力时就会发生卡钻，多见于水平井大斜度段及高渗透性地层。

### （二）井塌/掉块卡钻的“热－流－力”耦合失稳机理

深层地层井塌/掉块卡钻的核心是热－流－力多场耦合致井壁失稳，岩石坍塌或掉块后卡滞钻柱。高温引发热应力、加速钻井液与岩石反应，弱化井壁；钻井液冲刷、滤失破坏岩石胶结、改变孔隙压力，加剧失稳；地应力重构形成应力集中，叠加钻柱机械作用，导致岩石破裂掉块卡钻。天然裂缝会加剧破坏区域扩展，水平地应力差和流体压力差扩大破坏范围，溶质质量分数差可降低风险，钻井液温度对坍塌影响小但能减少拉伸破坏。

### （三）缩径卡钻的岩石黏弹塑性蠕变机理

缩径卡钻的核心成因是深层地层岩石的黏弹塑性蠕变特性，在高温、高压作用下，井壁岩石发生不可逆塑性变形，导致井径缩小卡滞钻柱。深层盐膏层、软泥岩、泥页岩等岩石黏弹塑性显著，蠕变变形随时间累积。盐膏层蠕变速率随温度、压力升高而加快，钻井液液柱压力与盐层压力的差值影响井径变化；软泥岩（尤其欠压实型）塑性大、蠕变速率高，主要受上覆地层压力和自身含水量影响，易快速蠕动缩径；胶结不良的砂岩、砾岩因钻井液滤失形成厚滤饼，也会引发缩径卡钻。分数阶 Maxwell 蠕变模型研究显示，井壁径向应变随时间增大，弹性模量、黏度系数越小、初始地应力越大，缩径越严重。

### （四）沉砂/岩屑床卡钻的多相流动力学机理

沉砂/岩屑床卡钻的核心是岩屑在井内堆积形成岩屑床，导致钻柱卡滞，其机理遵循多相流动力学规律。深层钻井中，钻头产生的岩屑本应随钻井液排出，但复杂井眼轨迹（水平井、大斜度井）使井眼底边流速偏低，岩屑易沉降堆积；高温会改变钻井液流变性能，若黏度、切力不足，悬浮携岩能力下降；循环排量低于临界携岩流速，也会促使岩屑床形成增厚。试验表明，岩屑床运移速度与流体密度、排量、转速正相关，增大排量可提速但压降受限，提高转速效果明显且对压降影响小。岩屑床过厚会挤占井眼空间，大幅增大摩擦阻力，钻柱静止或操作不当即可引发卡钻；固控系统失效、环空出现桥堵也会加剧该风险。

## 二、深层钻井卡钻早期识别与动态监测技术

### （一）卡钻前兆地面参数特征提取

国内外学者对于卡钻的预测进行了长期的研究，卡钻预警方法多以区域井统计分析和基于传统钻井物理模型为主<sup>[1]</sup>。卡钻事故

发生前钻井地面参数会出现明显异常，可通过提取这些异常特征实现卡钻早期识别<sup>[2]</sup>。深层钻井需重点监测钻井液性能、钻井施工及钻柱受力三类地面参数，不同类型卡钻的地面参数异常特征各不相同<sup>[3]</sup>。压差卡钻前兆为扭矩、摩阻逐渐增大，悬重波动减小，钻井液滤失量增大、含砂量超标，泵压基本稳定；井塌/掉块卡钻前兆表现为泵压突然升高且波动频繁，钻井液返出量减少、携带岩屑量骤增，扭矩、摩阻急剧增大，悬重突然下降；缩径卡钻前兆为起下钻阻力增大，扭矩逐渐升高，泵压略有上升，钻井液循环正常但井径测量值逐渐减小；沉砂/岩屑床卡钻前兆为泵压缓慢升高，扭矩、摩阻持续增大，钻井液返出岩屑量减少，悬重出现不规则波动<sup>[4]</sup>。通过建立地面参数异常阈值体系进行实时监测与数据处理，当参数超出阈值并持续异常时及时发出早期预警，指导现场调整施工参数以规避卡钻风险，例如监测到扭矩增幅、摩阻系数均突增大于20%时，需立即排查卡钻隐患。

### （二）基于随钻测量（LWD/MWD）的井下卡钻预警

随钻测量（LWD/MWD）是深层钻井井下参数监测的核心技术，可实时获取温度、压力、井径、钻柱振动等数据，为卡钻预警提供支撑<sup>[5]</sup>。其中 MWD 的振动冲击测量模块是卡钻预警关键，如同钻具“黑匣子”，能实时感知井下极端力学环境。LWD 可监测井径变化，结合压力数据预警缩径卡钻；MWD 实时监测钻柱多向振动、冲击加速度及温度，异常参数可预示井塌、掉块或压差卡钻风险<sup>[6]</sup>。现代 MWD 多采用高性能三轴加速度计，部分模块还兼具测温与数据存储功能，为预警分析提供依据。地面系统通过色码直观显示安全等级，出现红色警报时可及时采取控钻压、降转速等措施防范卡钻。同时利用 LWD/MWD 获取地层压力参数，结合钻井液密度可预判井壁失稳，提前优化钻井液性能，从源头降低卡钻风险。

### （三）基于大数据与机器学习的智能预警模型

深层钻井产生大量多源异构数据，基于大数据与机器学习技术，依托数据中台，结合物理模型、智能算法等可构建卡钻智能预警模型<sup>[7]</sup>。模型构建需经过数据预处理、特征工程、模型训练与验证三步，相关系统在50余口不同类型探井中应用，预警符合率达91.5%，具备可行性与实用性，国内外相关数字化平台也为其提供技术支撑。

## 三、深层地层高效解卡技术策略与优选

### （一）解卡技术分类及“黄金救援时间”界定

深层钻井解卡技术按原理分为化学、力学及非常规三类，化学解卡靠药剂破坏胶结、降阻；力学解卡通过机械力打破卡钻力学平衡；非常规解卡针对复杂顽固性卡钻，配套补救措施应对解卡失败<sup>[8]</sup>。深层卡钻“黄金救援时间”为发生后4-8小时，此时滤饼未固化、岩屑床未压实、井壁稳定，解卡成功率超85%；超时则卡钻加剧，成功率骤降，易引发钻柱断裂、井眼报废。盐膏层、软泥岩等易蠕变地层，因井径收缩快，黄金救援时间需缩短至4小时内。

### （二）化学解卡技术策略

化学解卡技术适用于压差卡钻、泥饼吸附卡钻，以及部分缩

径、沉砂卡钻。其核心是通过注入化学解卡剂,破坏滤饼结构、降低摩擦阻力、溶解或分散卡滞物,实现钻柱解卡。结合深层高温、高压环境,化学解卡剂需具备耐高温( $\geq 150^{\circ}\text{C}$ )、耐高压、配伍性好、无伤害地层等特点<sup>[9]</sup>。解卡剂选型需根据卡钻类型针对性选用,针对压差卡钻,选用滤饼破坏型解卡剂(如酸溶性乳化液、过硫酸铵氧化剂),其中含15%–20% HCl的酸溶性乳化液可定向破坏渗透性地层滤饼结构,过硫酸铵氧化剂可氧化滤饼中的有机杂质,降低滤饼强度,针对泥饼吸附卡钻,选用润滑型解卡剂,可降低钻柱与滤饼之间的摩擦系数<sup>[10]</sup>。针对沉砂、岩屑床卡钻,选用分散型解卡剂,可分散岩屑、沉砂,提高其流动性,便于随钻井液排出。化学解卡的施工流程为卡钻确认→停钻循环→注入解卡剂→浸泡反应→活动钻柱→解卡验证。深层地层施工时,需控制解卡剂注入速度( $2\text{--}3\text{m}^3/\text{h}$ ),确保解卡剂均匀分布在卡点区域。浸泡时间根据卡钻严重程度确定,一般为4–8小时,复杂情况下可延长至12小时,浸泡期间,定期小幅活动钻柱,促进解卡剂与卡点接触,提升解卡效果,解卡后,需循环钻井液,清除井内残留的解卡剂和岩屑,恢复正常钻井。

### (三) 力学解卡技术策略

力学解卡技术适用于井塌/掉块卡钻、缩径卡钻、沉砂/岩屑床卡钻,以及部分顽固性压差卡钻。其核心是通过施加机械力,打破卡钻的力学平衡,释放钻柱,深层地层力学解卡需结合钻柱强度、井眼状态,避免因机械力过大导致钻柱断裂、井壁进一步坍塌。常用的力学解卡技术包括震击解卡技术、旋转解卡技术和提拉–下放解卡技术,其中震击解卡技术分为上击解卡和下击解卡,通过在钻柱上连接震击器,利用震击器产生的冲击力,打破卡点的卡滞状态,适用于井塌/掉块、缩径、键槽卡钻,震击力需控制在钻杆疲劳极限以内,一般为1.2–1.5倍钻具重量。旋转解卡技术则通过缓慢旋转钻柱,利用旋转产生的扭矩,破坏卡点的摩擦阻力,适用于沉砂/岩屑床、轻度压差卡钻,旋转速度控制在5–10 r/min,避免高速旋转加剧井壁坍塌,提拉–下放解卡技术通过反复提拉、下放钻柱,利用钻柱的弹性变形,施加轴向力,打破卡点的吸附或卡滞状态,适用于轻度卡钻,提拉、下放速度需缓慢,避免产生冲击载荷。深层地层力学解卡时,需实时监测

钻柱受力、扭矩、泵压等参数,若参数出现异常,立即停止解卡操作,排查井眼状态,对于井塌/掉块卡钻,解卡前需先循环钻井液,清除部分岩屑、坍塌物,再进行力学解卡,避免盲目施加机械力导致井壁进一步坍塌,对于缩径卡钻,可结合划眼技术,通过钻头反复划眼,扩大井径,再配合震击、提拉解卡。

### (四) 非常规解卡技术及补救措施

深层复杂顽固性卡钻(如严重井塌、盐膏层蠕变缩径、钻柱卡死等)常规解卡效果不佳,需采用非常规解卡技术及配套补救措施以降低损失。常用非常规解卡技术有,水力脉冲解卡,利用高频水力脉冲破坏岩屑床、坍塌物结构,促进钻井液循环,适用于沉砂、严重井塌卡钻;高能气体压裂解卡,通过高压脉冲冲击井壁、破碎障碍物,适用于严重缩径、井塌卡钻,需控制压力防井壁破裂;定向铣削解卡,通过铣削键槽或坍塌物扩大井眼,配合震击提拉,适用于键槽卡钻、钻柱卡死。解卡失败后补救措施有,丢钻具解卡,丢弃卡死钻柱继续钻井,后续打捞;侧钻解卡,避开复杂井段重新钻井,适用于严重井塌、缩径无法恢复的情况;注水泥封固解卡(预防卡钻),钻过复杂井段后,注水泥封固该井段,凝固后重新钻井或侧钻。

## 四、结束语

本文围绕深层地层钻井卡钻事故的成因机理与高效解卡技术策略展开系统研究,针对深层高温高压、地层复杂、井眼轨迹多变等极端工况,全面剖析了压差卡钻、井塌/掉块卡钻、缩径卡钻、沉砂/岩屑床卡钻四类典型卡钻事故的核心成因机理,明确了各类卡钻的作用机制与影响因素,梳理了基于地面参数监测、LWD/MWD随钻监测及大数据机器学习的卡钻早期识别与动态监测技术,构建了涵盖化学、力学、非常规解卡及补救措施的高效解卡技术体系,界定了不同地层条件下的“黄金救援时间”,提出了针对性的技术优选原则与施工控制要点。后续可聚焦于不同区块深层地层卡钻机理的差异化分析,结合人工智能、大数据等前沿技术,进一步优化卡钻智能预警模型,完善卡钻事故防控与处置的全流程技术体系。

## 参考文献

- [1] 胜亚楠. 页岩气钻井卡钻故障预警方法研究与应用[J]. 河南科学, 2023, 41(11): 1569–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1004–3918.2023.11.002.
- [2] 任美洲. 定向井施工卡钻事故成因分析和预防措施[J]. 石化技术, 2022, 29(3): 203–204. DOI: 10.3969/j.issn.1006–0235.2022.03.093.
- [3] 叶芊, 贾相健. 定向钻井中压差卡钻事故的成因及其处理方法[J]. 中国井矿盐, 2010, 41(4): 20–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001–0335.2010.04.007.
- [4] 杜飞. 压差卡钻成因与事故分析[J]. 科技风, 2010(1): 88. DOI: 10.3969/j.issn.1671–7341.2010.01.080.
- [5] 杜高举. 基于层次分析法的钻井井塌卡钻事故分析研究[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11(1): 11–14. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7932.2011.01.005.
- [6] 王金平. 卡钻事故处理技术应用浅议[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(24).
- [7] 于丹, 郭文武, 蒋明. 地质岩心钻探吸附卡钻事故的预防与处理[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(8): 256. DOI: 10.3969/j.issn.1674–5167.2018.08.239.
- [8] 王宝. 米桑油田井下卡钻复杂情况处理技术应用[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(4): 204–206. DOI: 10.3969/j.issn.1674–2850.2025.04.067.
- [9] 许超, 石智军. 煤矿井下定向钻进钻孔事故的预防及处理[J]. 煤田地质与勘探, 2014(3): 100–104. DOI: 10.3969/j.issn.1001–1986.2014.03.023.
- [10] 孙庆春, 赵利锋, 刘涛. 大牛地气田水平井通井卡钻处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015(9): 34–37. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7428.2015.09.010.