

页岩气旋导卡钻研究及预防措施

易建乔, 刘文明, 王 振, 李 亮

中国石油集团长城钻探工程有限公司四川页岩气项目部, 四川 威远

收稿日期: 2023年3月17日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月24日

摘 要

随着页岩气勘探开发的不断推进, 水平井作为页岩气开发的关键核心技术, 由于四川威远地区的页岩气藏地质条件复杂, 钻井卡钻事故时有发生, 造成该地区旋转导向使用率较低, 制约了页岩气钻井提速提效。通过对前期24口卡钻井处理情况分析, 明确了该地区卡钻类型主要分为掉块卡钻、沉砂卡钻两大类, 并分析梳理了卡钻产生的原因及特点。本文从钻井液性能优化、井眼清洁监测系统应用、优化钻井工具、精细操作等方面制定了预防措施, 为威远地区页岩气水平井旋转导向安全施工提供了借鉴作用。

关键词

页岩气, 水平井, 旋转导向, 卡钻, 预防措施

Research and Preventive Measures of Shale Cyclone Guide Sticking

Jianqiao Yi, Wenming Liu, Zhen Wang, Liang Li

Sichuan Shale Gas Department, China National Petroleum Corporation Great Wall Drilling Company, Weiyuan Sichuan

Received: Mar. 17th, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 24th, 2023

Abstract

With the development of shale gas exploration and development, the horizontal well is the key technology for shale gas development. Due to the complex geological conditions of the shale gas reservoirs in Weiyuan County, Sichuan province, drilling sticking accidents often occur, the utilization rate of rotary steering is low in this area, which restricts the speed and efficiency of shale gas drilling. Based on the analysis of 24 sticking wells in the early stage, the types of sticking in this area are mainly divided into two types: block sticking and grit sticking, and the causes and characteristics of sticking are analyzed. In this paper, the preventive measures are formulated from the aspects of drilling fluid performance optimization, wellbore clean monitoring system ap-

plication, drilling tool optimization and fine operation, etc., it provides a reference for the safe operation of rotary steering of shale gas horizontal wells in Weiyuan County.

Keywords

Shale Gas, Horizontal Well, Rotary Steering, Sticking, Preventive Measures

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界,资源的争夺和竞争日益激烈,油气供需矛盾日益突出。由于天然气属于不可再生资源,经过多年大规模的生产,许多常规天然气田都已经处于开发中后期,天然气产量持续性递减,已经很难满足人们生产和生活的需求,在这个能源紧缺的时代,页岩气的开发和利用,对我们现在的能源结构来说是一个重要的补充。根据调查资料显示,我国页岩气查明资源储量约为36万亿立方米,经济价值巨大,资源前景广阔。相对于常规天然气,页岩气藏的储层一般呈低孔、低渗透率的物性特征,通常渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,孔隙度最高仅为4%~5%,气流阻力比常规天然气大[1],需实施水平井钻井和储层改造等技术才能有效开采。为降低钻井成本,提高单井产量,水平段长逐年增加,平均水平段长度由1381米(2014年)增至1789米(2022年),增加29.5%,水平段长度增加在提高产量的同时也增加了卡钻风险。为实现页岩气效益开发,近年来,针对页岩气卡钻这一难题,国内许多单位开展了页岩气卡钻机理研究及预防,并取得了一定进展。但由于川南地区地质条件复杂、断层发育等影响,卡钻事故仍时有发生。

据数据统计,2018年至今,长城威远地区共发生造斜-水平段卡钻埋旋导8口井,损失时间401.57天,井均损失50.19天,报废进尺6067.8米,给页岩气优快钻井带来了极大困难和挑战。本文调研分析了威远地区旋导卡钻原因并制定相应的预防措施,对页岩气水平井旋导转向安全施工具有一定的指导意义。

2. 卡钻类型与原因

Table 1. Statistical table of rotary guide tools falling into well in Weiyuan area in recent years

表 1. 近年来威远地区旋转导向工具落井统计表

井号	井深(m)	卡钻位置(m)	发生时工况	钻头上提高度(m)	处理情况	损失时间(h)	损失进尺(m)
威202H38-3	3409	3404	倒划接立柱	5	填井侧钻	861.5	952
威202H54-3	3164	3140	倒划接立柱	24	填井侧钻	721.25	328.68
威202H56-2	3154.63	3154	倒划接立柱	0.63	填井侧钻	735.33	247
威202H63-2	4027	4024.26	倒划接立柱	2.74	填井侧钻	1077.79	1334.12
威202H64-3	4850	4258	完钻后起钻	592	填井侧钻	2061.35	2067
威202H64-3	3313	3309	倒划接立柱	4	填井侧钻	1901	0
威202H64-6	4355	4353.61	倒划接立柱	1.39	填井侧钻	1095.5	515
威202H70-3	3533	3513	倒划接立柱	20	填井侧钻	1184	624

卡钻按照原因分类主要有键槽卡钻、沉沙卡钻、掉块(坍塌)卡钻、压差卡钻、缩径卡钻、落物卡钻等。

地层构造复杂、钻井液性能不良、操作不当都有可能造成卡钻，通过对近年来威远地区 8 口旋转导向工具落井卡钻事故分析(见表 1)，可以判断该地区卡钻类型主要是掉块卡钻和沉沙卡钻。

2.1. 掉块卡钻原因及特点

龙马溪组地层非均质性强，应力水平高且各向异性，易产生应力集中导致井壁失稳，从而产生大量掉块；同时龙马溪地层页岩层理、微裂缝发育，在多种外力作用下，钻井液易沿裂缝侵入地层岩石，产生水力尖劈作用，导致岩石发生破碎；加上该地层构造作用强烈，龙马溪地层交界处存在破损带，若不能及时将破碎岩石清洗出来，掉块卡钻风险极高[2]。卡钻时通常具有“秒杀”特征，即扭矩突然增大，泵压基本不变、大排量循环返砂无异常，发生时距离井底近等特点，主要发生在接立柱上提过程中。

2.2. 沉沙卡钻原因及特点

在井斜达到一定角度后，由于 Boycott 效应[3]，必然会有岩屑沉积于井眼低边，井斜角低于 30°岩屑一般会随钻井液返出井口；井斜角 30°~60°左右的岩屑床稳定性最差，停泵后容易发生雪崩式垮塌，堵塞井眼，掩埋钻具；水平段必然会有岩屑床存在，在钻头破岩量和钻井液携岩量达到动态平衡后，岩屑床厚度也会趋于稳定[4]。除了井斜角会影响岩屑运移外，还会影响钻井液流变性、钻速、转速、排量、钻柱尺寸及偏心等。威远地区龙马溪组地层埋深较深(3600~3800 米)，地层温度较高(150℃)，在高温高压作用下，油基钻井液携岩、悬浮能力难以保证；同时四开 $\Phi 215.9$ mm 井眼裸眼段长达 2000 米以上，水平段长达 1500 米以上，钻井液密度高、泵压高，排量受限导致易形成岩屑床。在沉砂较严重的情况下起钻，钻柱会将岩屑拉动、堆积，产生“推土机”效应，卡钻风险增加。卡钻时扭矩突然升高、顶驱憋停，泵压升高，主要发生在起钻中途。

3. 卡钻防治措施

通过对近年来 24 口卡钻井处理情况分析，目前该地区水平段施工卡钻的主要原因有以下几点：一是储层破碎，油基钻井液封堵性能较差，导致井壁易失稳；二是水平段后期钻井排量受限，井眼不清洁，易形成岩屑床；三是井队操作不细致或误操作等。对此从钻井液性能优化、井眼清洁监测系统应用、优化钻具组合、精细操作等几个方面开展水平段钻井防卡技术研究。

3.1. 优化钻井液性能

针对龙马溪组龙一 1¹小层存在破碎带，井壁易失稳的难题[5]，开展地层岩心理化性能分析，分析物理支撑和封堵防塌对提高井壁稳定的权重，为优化钻井液密度和钻井液封堵护壁性能提供理论支撑。

(1) 合理选择钻井液密度

通过分析邻井地质资料，科学合理确定钻井液密度参数，同时结合本地区施工经验， $\Phi 215.9$ mm 井眼施工时，按照“高开低走”的原则，科学制定钻井液施工技术措施[6]。造斜段施工中，由于龙一 1⁴至龙一 1¹间地层层理发育，均质性不好，容易出现掉块，因此适当提高钻井液密度，在保障井壁稳定的同时有利于悬浮举砂；水平段施工中，在保证井控安全及井壁稳定的情况下，尽量走钻井液密度设计底线，提高封堵剂加量，为快速钻进、水平段携岩清砂创造有利条件。

(2) 提高钻井液封堵能力

引入纳米胶液、柔性可变形粒子以及刚性粒子类封堵剂，形成了油基钻井液广谱封堵体系，突破了不同尺寸孔隙封堵技术瓶颈，封堵效果和泥饼质量显著提升(150℃高温高压在 3 ml 以内)，可有效减少滤液向地层的侵入，缓解孔隙压力传递，达到稳定井壁的目的[7]。在 A 点之前，由于地层比较破碎，最容易出现掉块，封堵剂加量提高至 6% 以上。

3.2. 井眼清洁监测系统应用



Figure 1. Rock chip flow measurement device
图 1. 岩屑流量测量装置

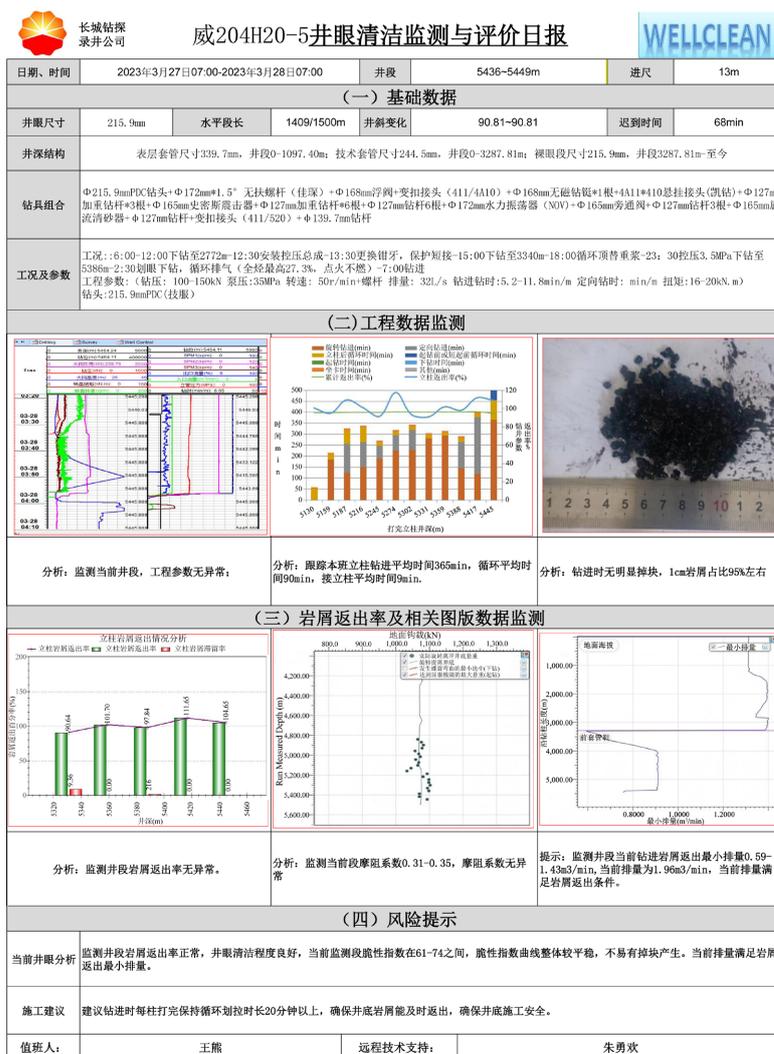


Figure 2. Analysis of the return rate of rock chips
图 2. 岩屑返出率情况分析

推广应用井眼清洁监测系统,该系统通过在钻井现场振动筛处安装岩屑流量测量装置(图 1),实时计算实际岩屑流量和理论岩屑流量,结合现场综合录井迟到井深、迟到时间、钻时等数据,定量化监测井底岩屑返出情况,进而对井筒状态进行评价[8] (图 2)。当实际返出岩屑量低于理论值时,说明井筒内有岩屑沉积,可以通过扫塞、改变钻井液流变性、提高钻柱旋转等方式破坏岩屑床[9] [10];当实际返出量高于理论值时,说明井筒不稳定,可以通过提高钻井液密度、提高钻井液封堵性能等方式提高井壁稳定性。因此,使用井眼清洁监测系统能有效预防页岩气水平井由于井壁坍塌和沉砂等原因而导致的卡钻事故。

3.3. 优化钻井工具

针对旋转导向在水平段施工过程中,容易发生掉块卡钻和沉砂卡钻的问题,一是在钻头和扶正器的肩部加装锥型齿(见图 3),增强倒划过程切削破碎能力,有效降低了倒划过程中因掉块问题造成卡钻的风险;二是在钻具组合中安放岩屑床清除器[11] (见图 4),由于岩屑床易在井斜 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 井段堆积,安放位置和数量可根据井下摩阻扭矩情况适当调整,一般距钻头 300~500 米内安放 2~3 只,造斜段安放 2~3 只。



Figure 3. Tapered teeth mounted on the shoulder of the drill
图 3. 钻头肩部加装的锥型齿



Figure 4. "Short section" debris bed remover
图 4. "短节型" 岩屑床清除器

3.4. 精细操作

操作不精细是导致“提死、扭死”的主观原因,虽然卡钻主要表现为“秒杀”,征兆不明显,但重视不到位,措施不明晰,操作不精细,是造成“提死、扭死”的直接原因。

(1) 倒划眼接立柱操作措施

接立柱上提钻具前,应保持钻进转速和排量充分循环,在恢复钻压至 20 kN 以内或恢复扭矩至空转扭矩后方可上提钻具。上提钻具操作特别是开始 3~5 米是防止卡钻的关键工序。

倒划扭矩设置为钻进扭矩的 70%~80%,转速调整至 30 rpm~50 rpm,上提遇阻不超过 20 kN,提出钻具一个单根以上,再连续上提钻具;发现扭矩明显增加、转速明显下降或遇阻超过 20 kN 时,应立即下放钻具,严防“提死”或“扭死”。

(2) 起下钻操作措施

起钻前保持钻进转速和排量循环三周以上,并确认振动筛基本无岩屑返出。起钻过程中,遇阻应不超过 100 kN,超过 100 kN 应立即下放钻具 1~3 柱,上提下放正常后进行大排量、高转速循环清洁井眼,再采用倒划眼方式起出遇阻井段。倒划扭矩控制在正常空转扭矩附加 5 kN·m。在“卡钻风险井段”起下钻应采取开泵拉划或划眼方式清洁井眼,通过风险井段。

(3) 钻进操作措施

钻进过程中应尽可能采用大排量、高转速钻进,以利于井眼清洁,减少岩屑床。 $\Phi 215.9$ mm 井眼钻进排量不小于 30 L/s;旋转导向钻进顶驱转速不小于 90 rpm;钻压 100 kN~160 kN,钻进扭矩推荐 25 kN·m。每钻进 300 m~500 m 根据扭矩、摩阻等井下情况进行一次短程起下钻,确保井眼清洁。出现扭矩、摩阻增加、返砂量异常、掉块增多等异常情况时,立即停止钻进,保持钻进排量和转速循环一周半以上,调整钻井液性能,在返出岩屑较少后进行一次短程起下钻。

(4) 卡钻后处理措施

发生卡钻后应及时收回旋转导向工具翼肋,采取“五步法”进行处理。

第一步:“循环、小幅活动处理”。发生卡钻 4 小时内,应以大排量循环、小范围上下活动处理为主,不宜在卡钻初期直接启动震击器进行解卡。

第二步:“循环、震击处理”。发生卡钻 4~6 小时期间,保持大排量循环,并启动震击器进行解卡。上提钻具卡钻,应主要采用向下活动钻具并启动震击器向下震击;下放钻具卡钻,应主要采用向上活动钻具并启动震击器向上震击活动。

第三步:“循环、大幅活动处理”。发生卡钻 6 小时以上仍未解卡,保持大排量循环,并及时采用允许最大载荷、大幅活动钻具的方式解卡。对于掉块卡钻,应采用大吨位上提解卡的方式解卡;对于沉砂卡钻,应采用大吨位反向活动的方式进行解卡。解卡操作时允许最大拉力应不大于钻具抗拉强度和钻机安全载荷,蹩顶驱扭矩解卡时顶驱扭矩设定值应控制在顶驱和钻具安全能力范围内,推荐不大于 45 kN·m。

第四步:“注解卡剂处理”。上述操作步骤不能解卡时,可考虑采用注解卡剂(包括泡酸)的方式进行解卡。

第五步:“倒扣处理”。及时快速组织爆炸松扣或切割工具,松扣或切割位置应靠近卡点。如果工具组织时间较长,应积极进行倒扣、打捞,避免井下情况持续恶化。

3.5. 措施效果

通过应用高性能油基钻井液体系、井眼清洁监测系统、优化钻井工具以及精细化管理等措施,威远地区水平段卡钻事故复杂率由 9.59% (2018 年)降低至 0.19% (2022 年)。近三年来,未发生旋转导向工具落井事故,旋转导向卡钻预防及治理成效明显。

4. 现场实例

(1) 威 202H35-1 井钻进至井深 4651 米(龙马溪组),打完立柱循环 35 分钟后起钻,倒划眼至 4642 米

顶驱憋停(见图 5), 发生卡钻, 多次小范围上下活动钻具无效后, 大排量循环扫塞, 同时启动随钻震击器, 下击 11 次后解卡。启动顶驱, 提高转数(100 r/min), 大排量循环(37 L/s), 井口返出大量细砂, 并伴有少量掉块。

该井卡钻主要原因是井下沉砂严重并有掉块产生, 起钻前仅循环 35 分钟(不足两周), 井底岩屑及掉块没有及时返出。卡钻后, 现场操作人员精细操作, 严格执行《卡钻防治工作手册》相关技术要求, 不“过提、过扭”是本井能顺利解卡的关键。

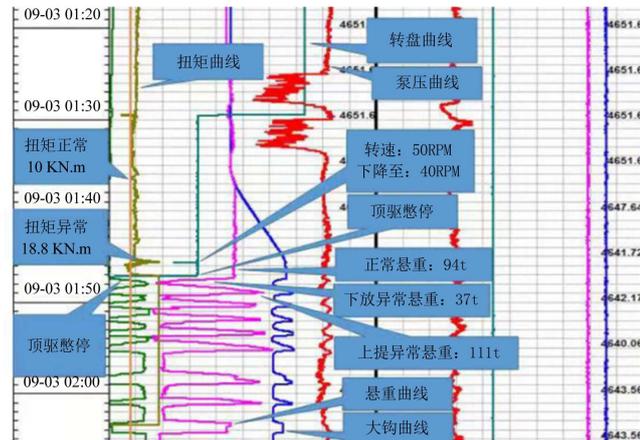


Figure 5. Well logging data of Wei 202H35-1 well jamming process
图 5. 威 202H35-1 井卡钻过程录井数据图

(2) 威 202H64-6 井钻进至 4355.63 米立柱打完, 循环 21 分钟后倒划接立柱, 倒划至 4353.68 米, 顶驱憋停, 立即下放至 4354.59 米, 顶驱恢复转动, 4 分钟后扭矩平稳、继续寸提倒划, 倒划至 4353.61 米, 扭矩突然增大、顶驱憋停, 造成卡钻。经过循环扫塞, 上下活动钻具、震击无效后, 爆炸松扣、填井侧钻。本次事故造成旋导工具落井, 损失钻具 21.09 m, 报废进尺 515 米、损失时间 45.66 天。

通过分析本次卡钻的过程, 造成本次事故的主要原因有以下几点: 一是龙马溪组地层破碎, 易产生掉块, 在倒划眼过程中, 掉块卡在扶正器与井壁之间, 扶正器没有切削功能导致卡钻; 二是钻井液封堵性较差, 滤液向地层侵入, 造成井壁不稳定, 倒划眼过程中由于钻柱震动、撞击等进一步增加坍塌范围; 三是操作人员责任心不强, 在第一次卡钻解卡后没有采取停止起钻、循环扫塞、大排量循环等措施, 而是继续倒划导致卡钻事故的发生。

5. 结论及建议

(1) 良好的钻井液体系是保证水平段钻进安全施工的前提。通过合理优化钻井液密度、应用油基钻井液广谱封堵体系, 在井壁稳定性和井眼清洁等方面取得了一定效果。

(2) 加大钻井新工具的推广应用。实践结果表明应用井眼清洁系统、岩屑床清除器能有效破坏岩屑床的形成。

(3) 加强管理和精细操作是卡钻预防的另一个重要因素。现场操作人员要熟知井下异常预警和常规处置程序, 严密监测相关参数, 一旦发现异常立即, 立即处理, 保证风险消除后继续作业; 发生卡钻后根据现场实际情况分析卡钻类型, 按照相应的处置流程进行操作, 提高解卡概率, 降低事故损失。

威远地区龙马溪组地质条件复杂、地层破碎, 必须进一步加大对钻井液性能与地层配伍性研究, 从强封堵材料优选、新老浆配比、固控设备使用、钻井液密度选择等方面开展技术攻关, 降低卡钻风险, 为旋转导向安全施工提供良好的井眼条件。

参考文献

- [1] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [2] 杨光伟. 威远地区页岩气水平钻井井壁稳定影响因素分析[J]. 科技创新导报, 2020, 17(4): 47-49.
- [3] 李洪乾, 刘希圣, 汪海阁, 等. 水平井各洗井区对钻井液流变参数的特殊要求及合理范围的确定[J]. 天然气工业, 1994, 14(4): 40-43.
- [4] 范玉光, 杨恒林, 付利, 等. 川渝地区水平井卡钻类型与防治措施研究[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(3): 87-90.
- [5] 孙凯, 刘化伟, 明鑫, 等. 自 201 井区页岩气井水平段安全高效钻井技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 104-109.
- [6] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 1-5.
- [7] 王建华, 张家旗, 谢盛, 等. 页岩气油基钻井液体系性能评估及对策[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 555-559.
- [8] 曾家新, 吴申尧, 罗艺, 等. 井眼监测系统在西南油气田的工程应用[J]. 录井工程, 2021, 32(2): 96-101.
- [9] 范玉光, 田中兰, 明瑞卿, 等. 国内外水平井井眼清洁监测技术现状及发展建议[J]. 石油机械, 2020, 48(3): 1-9.
- [10] 王建龙, 郑峰, 刘学松, 等. 井眼清洁工具研究进展及展望[J]. 石油机械, 2018, 46(9): 18-23.
- [11] 王晓松, 冯跃凯, 姬广奇, 等. 机械式岩屑清除工具在钻井作业中的应用[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(9): 24-25.