

湖南复杂地质条件区页岩气勘探优快钻井技术

王文彬^{1,2}, 洪俊展^{1,3*}, 李卫武^{1,2}, 邵 军¹, 刘 璐¹, 李化伟¹, 王欢欢¹

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410114; 2. 长沙市地球物理地球化学大数据技术创新中心, 湖南长沙 410114; 3. 湖南省绿色智能勘探工程研究中心, 湖南长沙 410114)

摘要:湖南省页岩气资源潜力巨大, 但受扬子陆块与江南隆起推覆带复合构造控制, 区内褶皱断裂发育、岩溶广泛分布、泥页岩水敏性强且软硬互层频繁, 导致深井钻探中井漏、井塌、井斜、取心困难、固井质量差及井控风险高等工程问题频发, 严重制约勘探开发进程。本文依据湖南省境内的60余口页岩气井资料和湖南省煤炭地质勘查院实施的30余口页岩气钻井的施工实践与重点井现场试验, 系统分析了湘西北及湘中南地区寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组、石炭系测水组、二叠系龙潭组及泥盆系余田桥组5套主力含气层系的工程地质特征与关键工程难题。针对页岩气井关键工程难题, 研发了低密度膨胀型承压堵漏技术(实现长段多漏点一次性封堵)、构建了“强抑制+高效封堵”一体化防塌技术体系(热滚回收率 $\geq 99.6\%$ 、16 h膨胀率 $\leq 3.24\%$)、研制了三种新型绳索取心钻具(岩心收获率由70%提升至90%以上)、形成了PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD井眼轨迹精准控制技术、建立了“近平衡钻进—主动节流排气—坐岗预警”一体化井控技术体系, 以及“安全下入—高效顶替—高韧性防窜”成套固井技术(固井优质率达100%)最终形成了适用于湖南省复杂地质条件区的四开次分段钻进、钻井液分级维护、固井全过程质控的页岩气井钻探施工技术体系, 已在30余口井中成功应用, 为南方复杂地质区页岩气及其他深部矿产钻探提供了重要技术支撑。

关键词:页岩气; 深井钻探; 复杂地质条件; 堵漏技术; 井眼轨迹控制; 绳索取心; 井控技术

中图分类号: P634.5; TE242 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0163-10

Research on optimized and fast drilling technology for shale gas exploration in complex geological condition areas of Hunan

WANG Wenbin^{1,2}, HONG Junzhan^{1,3*}, LI Weiwu^{1,2}, SHAO Jun¹, LIU Jun¹, LI Huawei¹, WANG Huanhuan¹

(1. Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410114, China; 2. Changsha Geophysical and Geochemical Big Data Technology Innovation Center, Changsha Hunan 410114, China; 3. Hunan Green Intelligent Exploration Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: Hunan Province has huge potential of shale gas resources, however, controlled by the composite structure of the Yangtze Block and the Jiangnan Uplift Nappe Belt, well-developed folds and faults, extensive karst distribution, strong water sensitivity of shale formations, and frequent interbedding of hard and soft rocks are characterized in this area, leading to frequent engineering problems in deep drilling, such as lost circulation, borehole collapse, well deviation, difficult coring, poor cementing quality, and high well control risks, which severely restrict the exploration and development process. Based on data from more than 60 shale gas wells in Hunan Province, as well as the drilling practice and field tests of key wells from more than 30 shale gas wells implemented by the Hunan Coal Geological Exploration Institute, this paper systematically analyzes the engineering geological characteristics and key engineering

收稿日期: 2026-04-13; 修回日期: 2026-05-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.017

基金项目: 湖南省地质院科研项目(编号: HNGSTP202616)

第一作者: 王文彬, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 长期从事钻探技术研究及施工管理工作, 湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号, 574937489@qq.com。

通信作者: 洪俊展, 男, 汉族, 1989年生, 高级工程师, 机械工程专业, 长期从事地质实验测试等技术研究工作, 湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号, 416482691@qq.com。

引用格式: 王文彬, 洪俊展, 李卫武, 等. 湖南复杂地质条件区页岩气勘探优快钻井技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 163-172.

WANG Wenbin, HONG Junzhan, LI Weiwu, et al. Research on optimized and fast drilling technology for shale gas exploration in complex geological condition areas of Hunan[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 163-172.

challenges of five major gas-bearing formations in northwestern and central-southern Hunan, namely the Niutitang Formation of the Cambrian, the Longmaxi Formation of the Silurian, the Ceshui Formation of the Carboniferous, the Longtan Formation of the Permian, and the Shetianqiao Formation of the Devonian. To address the key engineering challenges of shale gas wells, a low-density expandable pressure-bearing lost circulation control technology has been developed (achieving one-time sealing of long sections with multiple loss zones); an integrated anti-sloughing technology system of "strong inhibition+high-efficiency sealing" has been established (achieving a hot-rolling recovery rate of more than 99.6% and a 16 h expansion rate of no larger than 3.24%); three new types of wire-line coring tools have been developed (increasing the core recovery rate from about 70% to over 90%); a precise wellbore trajectory control technology combining PDC bit, single-bend screw motor and MWD/LWD has been developed; an integrated well control technology system of "near-balanced drilling-active throttling circulation-mud logging warning" has been established; and a complete set of cementing technologies featuring "safe casing running-high efficiency displacement-high toughness anti-channeling" has been formed (achieving a 100% high quality cementing rate). Finally, a deep shale gas drilling construction technology system suitable for the complex geological conditions of Hunan Province has been developed, consisting of four-spud sectional drilling, graded drilling fluid maintenance, and whole-process quality control of cementing. This system has been successfully applied in more than 30 wells, providing important technical support for shale gas and other deep mineral exploration in complex geological areas of South China.

Key words: shale gas; deep well drilling; complex geological conditions; lost circulation control technology; wellbore trajectory control; wire-line coring; well control technology

0 引言

湖南省页岩气资源潜力巨大。2012年国土资源部发布的《全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选》成果显示,湖南省页岩气资源量约为9.2万亿立方米,排名全国第六^[1-3]。

近年来,国内复杂地层页岩气钻探技术取得显著进展,承压堵漏、强抑制钻井液、地质导向、水平井优快钻井、长效固井等技术逐步成熟,但针对湖南“构造—岩性—地层压力”三重复杂条件的定制化成套技术仍不完善^[4-7]。本文依托湖南省自然资源厅科技计划项目(2020-23),通过湖南省境内的已有60余口井资料分析、重点井驻井实践与现场试验,系统研究复杂地质条件下页岩气井钻探关键技术与施工工艺,形成可复制、可推广的技术方案,对推动南方复杂区页岩气勘探突破具有重要意义^[8-11]。

1 区域工程地质背景与钻探难点

1.1 区域构造与主要页岩气地层

据不完全统计,湖南省境内先后实施的页岩气钻探工作包括湘页1井、湘平1井、涟页1-4井、湘邵地1井、湘新地1-3井等60余口浅钻、调查井和参数井。钻探揭示,湖南省页岩气主力勘探层系主要包括寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组、泥盆系余田桥组、石炭系测水组和二叠系龙潭组5套。受扬子

陆块与江南隆起推覆带复合构造控制,区内褶皱断裂发育、地层倾角多变、岩溶与裂隙广泛分布,泥页岩普遍具有水敏性强、易膨胀缩径、脆性破碎等特征。据统计,已完成钻井中发生不同程度井下事故的比例超过80%,平均延误工期30 d以上,部分井因恶性事故报废,严重制约勘探进程^[12-13]。

牛蹄塘组分布于湘西北地区,为一套区域性富有机质黑色炭质页岩,厚度100~280 m,在近年来的页岩气勘探中获得较好气体显示,但有机质热演化程度普遍较高^[14]。该组地层泥质含量高、水敏性强,施工中易出现水化膨胀、缩径、井壁垮塌等工程问题。

龙马溪组同样分布于湘西北地区,下段为黑色炭质页岩、硅质页岩,上段为灰绿色页岩、粉砂质页岩。上覆小河坝组泥质粉砂岩、石英砂岩硬度大、研磨性强,易造成钻头磨损和井斜。

余田桥组分布于湘中坳陷地区,以灰黑色泥灰岩、泥岩及硅质岩为主,泥页岩有效厚度可达200余米。地层中高角度裂缝发育,钻开后应力释放易导致井壁垮塌和漏失^[15-17]。

测水组分布于湘中、湘南地区,为一套滨海沼泽相碎屑岩沉积,含煤层和炭质泥岩,是重要含气层。上覆梓门桥组灰岩、白云岩裂隙和溶洞发育,极易发生井漏。

龙潭组分布于湘中、湘南地区,为海陆交互相

含煤沉积,泥岩与页岩互层厚度均大于30 m,是重要烃源岩^[18]。上覆长兴组、大隆组含燧石团块及硅质岩,研磨性强,钻头磨损严重。

1.2 主要工程地质问题

基于对省内60余口页岩气井钻探资料的统计分析,湖南省页岩气深井钻探面临的工程地质问题可归纳为“漏、塌、斜、取、固”五大核心难题,兼有可钻性差与井控风险高的特点,各类问题发生比例及典型案例如下:

(1)井漏极端频发(发生率>60%):灰岩、白云岩等碳酸盐岩地层裂隙、溶洞、暗河发育,易发生渗透性、裂缝性乃至溶洞性恶性漏失。湘页1井二开失返性漏失,清水强钻至1370 m,累计漏失钻井液15814 m³;慈页1井累计漏失钻井液8126 m³。

(2)井壁易垮塌(发生率>40%):泥页岩水敏性强、构造破碎带发育,易掉块、缩径、整体垮塌。黔水地1井打屋坝组泥页岩段因井壁失稳导致卡、埋钻,最终填井侧钻。

(3)可钻性差(普遍存在):硅质页岩、石英砂岩等硬脆性岩石研磨性强,钻头磨损严重,机械钻速低。湘张地1井灯影组机械钻速<1 m/h;湘新页1井欧家冲组软硬互层,钻速约3 m/h。

(4)井斜控制困难(发生率>30%):软硬互层、高陡地层倾角大,易井斜超标。湘新地2井在井深1270 m处井斜达58.4°,被迫停钻。

(5)岩心收获率低(目的层普遍<80%):目的层岩心破碎、易软化,收获率普遍偏低。湘慈地1井目的层段岩心收获率仅70%(设计要求>85%)。

(6)固井质量难保障:地层承压低、气窜风险高、油基钻井液污染界面,难以满足后期压裂要求。

(7)浅层气与井控风险高:浅层气压力高、预警时间短,溢漏同存风险突出^[19-21]。湘龙页1井全烃值最高达72.78%,实施4次主动节流放喷点火,最大火焰高度3 m。

2 关键技术研究与应用

2.1 井漏精准处置技术

针对湖南省裂缝性、溶洞性、渗透性三类漏失,研发低密度膨胀型承压堵漏技术,实现长段多漏点一次性承压封堵。技术核心为复合型填充剂+承压剂+低密度油层保护剂+纤维+水泥复配,形成膨胀固结、架桥封堵、承压增强协同作用,滞留能力

强、封堵强度高、可泵性好,可快速适配漏失程度调整配方与承压能力^[22]。

典型配方如下:

(1)低密度膨胀型堵漏浆配方为:40 m³井浆+1.0%~3.0%复合型填充剂+1.0%~4.0%复合型承压剂+0.5%~0.8%低密度油层保护剂+0.8%~1.0%低密度调整控制剂+0.2%~0.5%低密度流型调节剂+0.4%~0.6%多功能流型调节剂+2.0%~4.0%棉籽皮+0~0.5%锯末+0.5%~1.0%水泥。

(2)低密度膨胀型中强度堵漏浆配方为:40 m³井浆+4.7%复合型填充剂+5.7%复合型加固剂+4.7%复合型承压剂+0.4%低密度油层保护剂+0.9%低密度调整控制剂+0.4%低密度流型调节剂+0.9%多功能流型调节剂+2.0%棉籽皮+3.8%水泥。

(3)低密度膨胀型高桥塞堵漏浆配方为:40 m³井浆+1.6%~3.0%复合型填充剂+1.6%~2.5%复合型加固剂+1.6%~2.0%复合型承压剂+0.8%低密度油层保护剂+0.8%~1.0%低密度调整控制剂+0.5%低密度流型调节剂+0.4%~0.5%多功能流型调节剂+2.0%~3.0%棉籽皮+1.6%~6.0%水泥。

低密度膨胀型堵漏浆在湘页1井的井漏处理中得到成功应用。该井二开钻至779 m时发生微漏,钻至781.11 m时漏速达80 m³/h,钻井液密度1.08 g/cm³,黏度51 s;钻至867 m时发生失返性漏失,初步判断为灰岩裂缝性漏失,采用清水强钻至1370 m,累计漏失15814 m³,强钻期间874~940 m井段出现三次放空现象。先后采用桥堵浆、高失水堵漏剂(DTR)、注水泥等方法进行8次堵漏施工均未成功。采用低密度膨胀型堵漏浆分3次进行承压堵漏施工后,全井漏失点被封堵,地层承压能力提高到1 MPa以上,后续钻进、下套管及固井作业均未发生漏失。

2.2 井壁稳定与防塌技术

针对泥页岩地层水化膨胀、应力垮塌及破碎掉块三大失稳机理,构建了“强抑制+高效封堵”一体化防塌技术体系。

钻井液方面,推广两性离子聚合物及聚合物-聚磺防塌钻井液体系,引入有机硅腐殖酸钾等抑制剂。其作用机理为,抑制剂分子中的Si-OH键与黏土表面Si-OH键缩聚形成Si-O-Si键,在黏土表面

形成疏水吸附层,阻止水化;钾离子通过晶格固定作用抑制黏土膨胀分散。室内实验表明,该体系热滚回收率 $\geq 99.6\%$ (常规钻井液仅46.5%),16 h高温高压线性膨胀率 $\leq 3.24\%$ (常规为7.68%)。加入随钻封堵剂后,砂床滤失量为0,可有效封堵微裂缝。

工程措施方面,控制钻井液密度以平衡坍塌压力,维持低滤失减少地层浸泡,优化起下钻速度以降低压力激动,及时划眼修整井壁。

现场应用:湘龙页1井钻遇巨厚泥页岩地层,多次发生垮塌埋钻,后采用低固相强抑制钻井液体系、简化钻具组合、合理控制密度,侧钻后顺利完钻,井壁稳定性显著提升。湘新页1井全井应用该

技术,未发生垮塌卡钻故障。

2.3 复杂地层高效取心技术

针对页岩气目的层岩心破碎、易软化难题,研制3类新型绳索取心钻具,岩心收获率由70%提升至90%以上。

(1)不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具(见图1)。该钻具增加了第三层岩心容纳管,内钻头超前钻进起隔水护心作用;拦簧在提钻时收拢托住岩心,防止破碎岩心脱落。在雪峰山先导孔破碎地层应用后,岩心收获率由普通钻具的74%左右提升至95.5%(见图2和表1)。

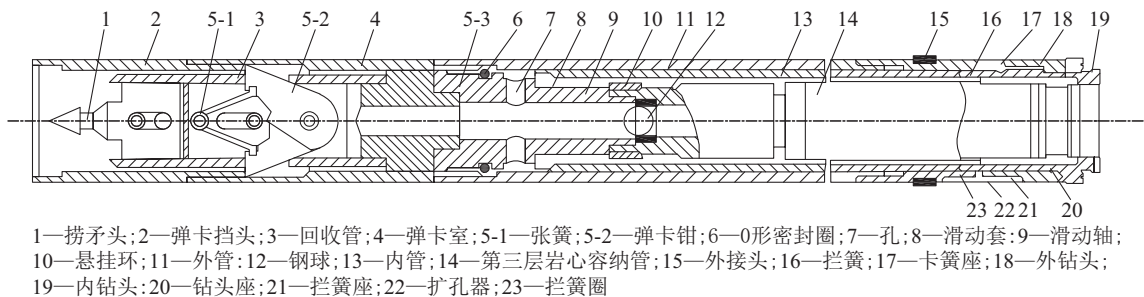


图1 不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具

Fig.1 Wire-line coring drilling tool with retaining spring protecting core for inner bit replacement without tripping out

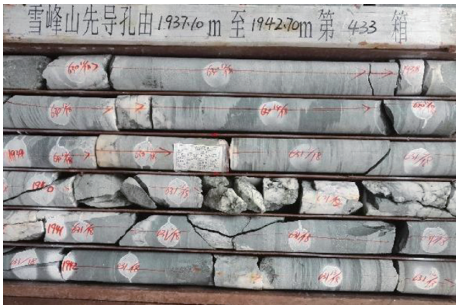


图2 新型绳索取心钻具所取得岩心

Fig.2 Cores obtained by the new wire-line coring tool

(2)无泵反循环超前侧喷绳索取心钻具(见图3)。该钻具设计了:①防堵锥网隔绝细小颗粒,保持内外管通畅,防止内管卡死;②缩短内管并采用无泵接手隔离水体,减小岩心上部水压,利用负压吸力阻止岩心下滑;③超前侧喷钻头(见图4)改变钻井液流向,从侧方水口流出,避免冲刷破碎岩心,超前齿保护岩石完整性。在湘慈地1井910.9~1100 m破碎带

表1 新型绳索取心钻具试验井段取心情况

Table 1 Coring performance of the new wire-line coring tool in test well sections

回次编号	钻进井段/m	回次进尺/m	取心长度/m	岩心收获率/%
1	1239.75~1242.25	2.5	2.42	96.8
2	1242.25~1244.75	2.5	2.33	93.2
3	1244.75~1247.25	2.5	2.41	96.4
4	1247.25~1249.75	2.5	2.39	95.6
5	1249.75~1252.25	2.5	2.39	95.6
总计		12.5	11.94	95.5(平均)

应用后,岩心收获率由普通钻具的76.3%提升至94.4%(见表2)。由图5可知,通过本钻具所取出的岩心较完整,基本能够保持其原生结构。

(3)囊袋多节捆绑式绳索取心钻具(见图6)。该钻具在传统绳索取心钻具基础上增加了多节捆绑式囊袋总成及超前侧喷钻头。可伸缩囊袋采用线型低密度聚乙烯与高密度聚乙烯共混材料制成,

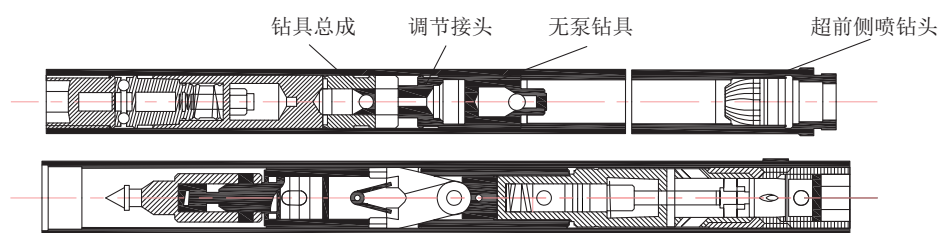


图3 无泵反循环超前侧喷绳索取心钻具结构

Fig.3 Structure of pump-free reverse circulation advanced side-jet wire-line coring tool

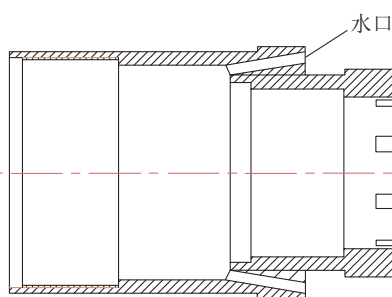


图4 超前侧喷钻头结构

Fig.4 Structure of the advanced side-jet drill bit



图5 无泵反循环超前侧喷绳索取心钻具所取岩心

Fig.5 Cores obtained by the pump-free reverse circulation advanced side-jet wire-line coring tool

表2 湘慈地1井685.05~1100 m 岩心收获率

Table 2 Core recovery rate of Xiangcidi-1 well from 685.05 to 1100m

钻具类型	钻进井段/m	回次进尺/m	取心长度/m	岩心收获率/%
普通钻具	685.05~910.9	225.85	172.3	76.3
新型钻具	910.9~1100	189.1	178.6	94.4

兼具高抗穿透性、易拉伸性和加工性,可自动收缩束紧岩心,防止滑落;底部橡皮箍筋圈在囊袋充满岩心时箍紧,泵压升高预警。配合超前侧喷钻头(阶梯状变径钢体、斜水口),改变钻井液流向,避免冲刷内管岩心。在永页2井1055.76~1108.96 m井段应用后,岩心收获率由最低79%提高至90%以上。

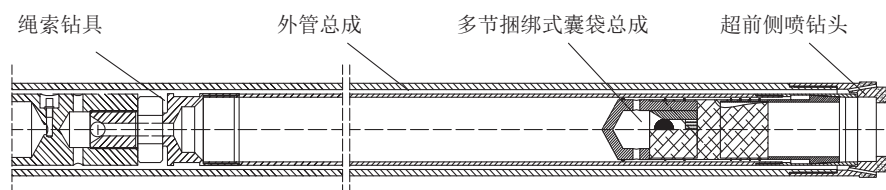


图6 囊袋多节捆绑式绳索取心钻具结构示意图

Fig.6 Schematic structure of a capsule-type multi-section bundled wire-line coring tool

2.4 井眼轨迹精准控制技术

针对湖南复杂地质条件区高陡地层、软硬互层导致的井斜失控难题,形成了以直井防斜纠斜为核心、兼顾小口径定向井的井眼轨迹控制技术。湖南省页岩气深井主要为大口径参数井($\Phi 311.2$ mm及以上),施工中易斜层段长,常规防斜技术效果有限。

直井防斜纠斜:采用“单弯螺杆+MWD随钻测斜+复合双驱防斜钻具”组合,通过轻压吊打与动态纠斜相结合。弯外壳马达旋转产生的离心力使钻

头倾角和增斜力方向随钻具公转同步变化,消除钻具弯曲造成的井斜;滑动钻进时利用弯外壳马达导向快速纠斜。湘新页1井(大口径参数井,完钻井深2680 m)采用 $\Phi 311.15$ mm PDC钻头+ $\Phi 203$ mm 1.25°螺杆+MWD组合,在588.78~826.57 m井段应用后,井斜由3.98°降至0.78°,每100 m降斜1.172°;慈页1井经两次复合双驱纠斜作业,井斜由4.5°降至3.37°。上述实践表明,该技术在湖南大口径井中降斜效果显著。

小口径定向井轨迹控制:针对湖南保靖、龙山

等区块部署的定向井($\varnothing 215.9$ mm),采用PDC钻头+单弯螺杆+MWD组合,配合水力振荡器降摩减阻,实现了储层精准入靶。

2.5 新型钻井液与护壁堵漏一体化技术

2.5.1 抗高温聚合物钻井液

针对深井高温环境,研发了抗高温聚合物水基钻井液。该体系在聚合物C-C主链的侧链上引入酰胺基、羧基、磺酸根($-\text{SO}_3\text{H}$)等特殊功能基团(如磺化聚合物Polydrill、SSMA等),显著提高抗温能力(最高达 180°C)。同时,利用表面活性剂的两亲作用改善钻井液抗温性,添加抗氧化剂可大幅提升磺化聚合物降滤失剂的高温稳定性。在高温下,采用皂石、海泡石等黏土矿物替代常规膨润土,能更好地控制流变性和滤失量,实现强抑制、低滤失,满足深井高温钻进需求。

2.5.2 强抑制聚合物钻井液

开发了阳离子聚合物钻井液体系。其主剂为引入阳离子基团(如季胺基 $-\text{N}^+$)的有机聚合物包被剂(如阳离子聚丙烯酰胺),并复配小分子季胺盐(如羟丙基三甲基氯化胺)。阳离子基团可中和黏土颗粒表面的负电荷,减小静电斥力,使聚合物在更多位置上与黏土发生桥链,形成致密保护层;分子链中的疏水基团可阻止水分子进入,有效抑制页岩水化膨胀和分散。室内抑制性评价表明,该体系抑制能力远优于常规阴离子聚合物钻井液。

2.5.3 油基钻井液防漏堵漏

针对页岩气水平井长水平段及微裂缝发育地层的漏失难题,建立了刚性颗粒与弹性粒子复配的高温高密度油基钻井液堵漏技术。刚性颗粒优选JHCarb酸溶性暂堵剂(碳酸钙类),粒径从10目至1200目系列化,具有高强度、不水化、不变形等特点,在裂缝狭窄处形成骨架桥接。弹性粒子优选H-Seal弹性石墨及HiFLEX变形颗粒,具有良好回弹性(30 MPa下回弹性32.26%,最大形变率54.36%),可适应裂缝宽度变化,增强封堵层稳定性。

室内评价表明,高密度油基钻井液($1.8\sim 2.2\text{ g}/\text{cm}^3$)加入复配堵漏材料后,在 150°C 高温下性能稳定,高渗岩心在25 MPa压力下承压24 h滤失量为0,侵入深度仅2.3 cm(见图7)。该技术可有效封堵纳米至毫米级裂缝,满足长水平段防漏堵漏要求。

2.5.4 随钻封堵

在聚合物-聚磺防塌钻井液体系中,加入随钻

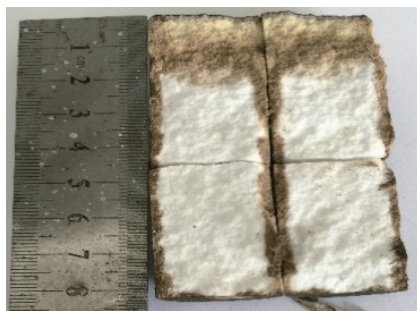
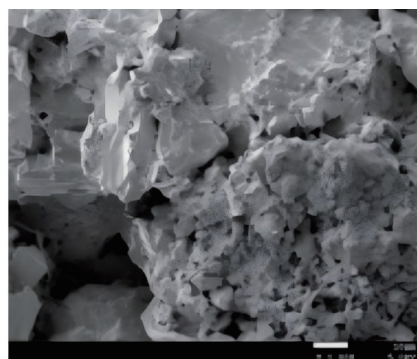


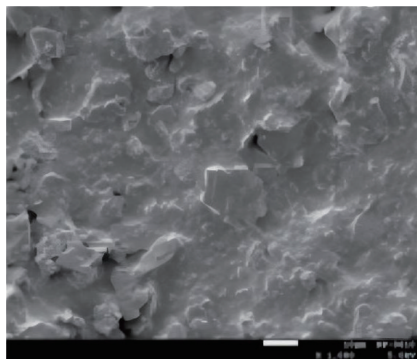
图7 岩心承压实验侵入深度

Fig.7 Invasion depth in core pressure-bearing test

封堵剂(如QS-2、单封、复合堵漏剂、超细碳酸钙等)实现微裂隙全粒径封堵。室内可视砂床评价表明:未加封堵剂时钻井液全部侵入砂床,滤失量25 mL;加入3%随钻封堵剂后,侵入深度仅3 cm,砂床滤失量为0。实验数据表明,加入封堵剂之后的聚合物-聚磺防塌钻井液具有良好的封堵性能,图8为电镜扫描前后对比,加入封堵剂后封堵层表面致密。该技术将防漏与护壁协同作用,在湘新页1井全井应用,有效防止了潜在性漏失,实现了井壁稳定与钻井液漏失控制的双重目标。



(a)未加封堵剂



(b)加封堵剂

图8 封堵层电镜扫描对比分析情况

Fig.8 Comparative SEM analysis of plugging layers

2.6 井控与近平衡钻井技术

页岩气勘探区域地层压力不确定性大,且常伴有井漏与井涌并存的复杂工况,井控风险显著高于常规油气井。本研究参照常规油气井控标准(SYT 5742—2007),结合湖南及邻区页岩气钻井实践,形成了“近平衡钻进-主动节流排气-24 h坐岗-分级预警”一体化的井控技术体系。

装备配置:依据地层压力选用符合标准的环形防喷器、闸板防喷器及配套管汇,必须安装液气分离器、除气器,放喷管线保持长明火。

监测预警:进入目的层前50 m启动24 h坐岗,每15 min监测液面及全烃变化,提钻前计算油气上窜速度(慈页1井为96 m/h),异常按 0.02 g/cm^3 循环周均匀加重。

近平衡与主动节流:基于页岩气吸附气为主、超低孔渗、气体释放缓慢特征,创新主动节流循环近平衡钻井技术。当全烃值 $>60\%$ 时主动节流排气、放喷点火2个循环周,快速降低井内压力;每次压井以 0.02 g/cm^3 提高密度,起钻前泵入高于正常钻进所用钻井液密度 0.03 g/cm^3 的重浆,每钻进200 m或纯钻24 h进行短程起下钻,储备2倍井筒容积的重浆。

溢漏同存与浅层气处置:浅层气具有埋藏浅、压力高、变化快的特点。钻遇浅层气时坚持“以排为主”的处理方案,尽可能在转浆前将气层能量耗尽;若溢漏同存则坚定不移执行“先排后压”方案;钻开高压层前对低压层进行承压堵漏。

湘龙页1井采用上述井控技术体系,完钻密度 1.23 g/cm^3 (较埋钻前降低 0.10 g/cm^3),实施4次主动节流放喷,井控安全。慈页1井未发生井控事故。平衡钻进与主动节流循环相结合的井控技术,能够有效降低页岩气钻井过程中的井控风险,尤其适用于高压、漏失与气侵并存的复杂地质条件区。

2.7 高性能固井技术

针对页岩气井中存在的井壁不稳定、井径不规则、顶替效率差及气窜风险高等井段的固井技术难题,形成了“安全下入-高效顶替-高韧性防窜”成套固井技术。

套管居中:采用整体弹性扶正器与旋流式树脂扶正器交叉布置,配合“龙抬头”工艺降低下入摩阻,确保套管居中度 $\geq 67\%$ 。

前置液驱替:采用“两段清油型钻井液+悬浮

型隔离液+稀水泥浆”四级冲洗工艺,清除井壁与套管壁油膜及泥饼,清洗效率达95%以上,有效提升界面胶结强度。

水泥浆体系:构建三凝三密度浆柱结构——领浆(1.50 g/cm^3 低失水早强低密度)、中浆(1.85 g/cm^3 低失水微膨胀)、尾浆(1.90 g/cm^3 胶粒膨胀)。该体系防窜性能SPN值 <3 ,目的层水泥石弹性模量 $<7\text{ GPa}$,兼具防漏、防窜、高韧性特点,满足体积压裂对水泥环力学性能的要求。

预应力固井:采用清水顶替降低套管内液柱压力,结合环空憋压3~5 MPa(管内外压差达18.66 MPa),使套管在候凝过程中挤压水泥石,消除微间隙,有效防止环空后期带压及气窜。

应用效果:湘新页1井应用该技术后,固井优质率达100%,承压与防气窜性能满足后期压裂作业要求,为复杂地质条件区页岩气井固井提供了可靠技术支撑。

3 钻探施工技术体系

基于上述研究,形成了适用于湖南省复杂地质条件区页岩气井大口径参数井钻探的施工技术体系。该体系采用直井多开次结构(导眼——开——二开——三开),针对各开次工程地质特点分段施策,配套优化钻井液工艺与固井工艺,实现了安全、优质、高效钻进。

3.1 井身结构与分段钻进工艺

针对湖南页岩气井(设计井深1500~3000 m)地层特点,优化了直井多开次结构,各开次设计参数及技术要点见表3。

现场实施中,各开次严格执行以下操作要点:

导眼:清水强钻,遇漏抢钻,水源不足时快干水泥堵漏,钻遇溶洞回填混凝土,排量 $>65\text{ L/s}$,防沉砂。

一开:低钻压(40~60 kN)、高转速(60 r/min),每立柱探沉砂,稠浆携砂,短起破坏岩屑床,完钻双扶通井。

二开:单根测斜,使用MWD实时监测井斜,固控设备(除砂器、离心机)全程开启,含砂量 $<0.5\%$,中完后承压试验。

三开:取心作业根据地层破碎程度选择三种新型绳索取心钻具,落实24 h坐岗及主动节流循环,完钻通井电测。

表3 井身结构与分段钻进关键参数

Table 3 Wellbore structure and key parameters of sectional drilling technology

开次	钻头直径/ mm	钻具组合特点	钻井液体系	密度/ (g·cm ⁻³)	核心控制目标
导眼	660.4/609.6	牙轮钻头+螺扶+钻铤	清水/膨润土浆	<1.05	防漏、防斜、快速穿过松散层
一开	444.5/406.4	牙轮钻头+螺扶+钻铤+加重钻杆	膨润土浆	<1.05	大井眼携砂、防止沉砂卡钻
二开	311.2	PDC钻头+1°螺杆+MWD+扶正器	两性离子聚合物	<1.10	防塌、防斜、MWD随钻纠偏
三开	215.9	PDC钻头+1.25°螺杆+MWD(定向段)	聚合物-聚磺	1.10~1.36	取心、轨迹控制、井控

3.2 钻井液分级维护工艺

根据开次及地层特性,采用“一开一策”分级维护策略,各开次钻井液体系及关键性能指标见表4。

维护要点:二开、三开均采用“等浓度法”补充胶液,维持性能稳定;加入3%随钻封堵剂实现微裂缝全粒径封堵;固控设备(振动筛240目、除砂器、离

心机)使用率100%,控制劣质固相。

3.3 固井全过程质量控制

针对导管、表层套管、技术套管、生产套管实施分级固井,严格遵循“通井净化一套管居中一注替平稳一候凝憋压”技术流程。各层套管固井技术参数见表5。

表4 钻井液体系分级维护参数

Table 4 Graded maintenance parameters of drilling fluid system

开次	体系类型	主 要 配 方	滤失量/mL	黏度/s	关键功能
导眼/一开	清水/膨润土浆	6%~8% 土 浆 +0.3%~0.5% HV-CMC+0.2%~0.3% KPAM	<8	40~60	低成本携砂、快速钻进
二开	两性离子聚合物防塌	3%~4% 膨润土+0.3%~0.5% KPAM+0.5%~1% 铵 盐 +0.5% FA-367+1%~2% 有机硅腐殖酸钾+封堵剂	<5	45~60	强抑制、防塌、防漏
三开	聚合物-聚磺防塌	2%~3% 膨润土+0.3%~0.5% KPAM+0.5%~1% 铵 盐 +1%~2% 有机硅腐殖酸钾+1% 防塌防卡剂+1% 广谱护壁剂+2% 磺化褐煤树脂	<4	50~70	高封堵、润滑、适配取心

表5 分级固井技术参数

Table 5 Technical parameters of graded cementing

套管类型	扶正器类型	前置液工艺	水泥浆体系	特 殊 措 施
导管	螺旋钢筋扶正	—	常规早强水泥	漏失时环空灌注
表层套管	弹性扶正器	大排量携砂	早强+堵漏剂	正注反挤
技术套管	双扶通井	平衡压力设计	常规密度	承压试验
生产套管	弹性+旋流扶正器交叉 (居中度≥67%)	四级冲洗(清洗效率 >95%)	三凝三密度(1.50/1.85/ 1.90 g/cm ³)	清水顶替+环空憋压3~5 MPa

核心控制指标:生产套管居中度≥67%,采用CEMSTR软件模拟优化。

四级冲洗工艺:两段清油型钻井液+悬浮型隔离液+稀水泥浆,确保界面胶结强度。

水泥石弹性模量<7 GPa,SPN值<3,满足体积压裂要求。

3.4 技术体系应用效果

该技术体系在湘新页1井、慈页1井、湘龙页1

井等30余口页岩气井中成功应用,取得以下效果:

(1)井壁稳定,全井未发生因井壁失稳导致的卡钻事故,二开、三开井径扩大率控制在10%以内;

(2)井漏有效控制,采用低密度膨胀型堵漏技术,湘页1井实现长段多漏点一次性封堵,后续作业无漏失;

(3)岩心收获率提高,三种新型绳索取心钻具应用后,目的层平均岩心收获率由70%提升至

92.5%;

(4)井身质量提高,直井段井斜 $<1^{\circ}/100\text{ m}$,定向井中靶精度满足设计要求;

(5)固井质量提高,生产套管固井优质率100%,后期压裂未发生环空带压;

(6)钻井周期缩短,较前期同类井平均缩短25 d,综合成本降低约18%。上述实践表明,该施工技术体系有效解决了湖南省复杂地质条件区页岩气深井钻探的工程难题,具有良好的推广价值。

4 结论

(1)湖南省页岩气五套主力含气层(牛蹄塘组、龙马溪组、测水组、龙潭组、余田桥组)地质构造复杂、岩溶发育、泥页岩水敏性强、软硬互层频繁,导致井漏、井塌、井斜、取心、固井五大工程难题。

(2)研发的低密度膨胀型堵漏技术、两性离子/聚磺防塌钻井液体系(热滚回收率 $\geq 99.6\%$,16 h膨胀率 $\leq 3.24\%$)、三种新型绳索取心钻具(岩心收获率由70%提至90%以上)、PDC钻头+螺杆+MWD轨迹控制技术、三凝三密度固井工艺(优质率100%)及主动节流井控技术,有效解决了上述难题。

(3)形成的四开次分段钻进、钻井液分级维护、固井全过程质控工艺体系,已在湖南30余口页岩气井应用验证,固井优质率100%,未发生井壁失稳卡钻事故。

参考文献(References):

- [1] 张所续.世界页岩气勘探发现现状及我国页岩气发展展望[J].中国矿业,2013,22(3):1-3,11.
ZHANG Suoxu. The exploration and development situation of world shale gas and development of China's shale gas outlook [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(3): 1-3, 11.
- [2] 程涌,郭宇丰,陈国栋,等.中国页岩气资源潜力、分布及特点[J].昆明冶金高等专科学校学报,2017,33(5):17-24.
CHENG Yong, GUO Yufeng, CHEN Guodong, et al. On resource potential, distribution and characteristics of shale gas in China [J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2017, 33(5): 17-24.
- [3] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践[J].天然气工业,2011,31(12):26-39.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Formation conditions and exploration practice of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [4] 赵洪波,朱芝同,梁涛,等.页岩气基础地质调查钻井技术研究进展及展望[J].中国地质,2023,50(2):376-394.
ZHAO Hongbo, ZHU Zhitong, LIANG Tao, et al. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect [J]. Geology in China, 2023, 50(2): 376-394.
- [5] 何远信,胡志方,单衍胜,等.公益性陆域油气地质调查钻探工程技术进展与攻关建议[J].钻探工程,2022,49(5):3-10.
HE Yuanxin, HU Zhifang, SHAN Yansheng, et al. Advances and research suggestions for onshore oil&gas survey drilling engineering for the public benefit [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 3-10.
- [6] 韩毅,张绍和,王文彬,等.湘西北复杂构造区雪峰山先导孔钻进技术[J].钻探工程,2021,48(7):20-25.
HAN Yi, ZHANG Shaohe, WANG Wenbin, et al. Drilling technology for Xuefengshan pilot hole for shale gas geological survey in northwest Hunan [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 20-25.
- [7] 尹欣,蒙发强,李明星,等.柳州地区页岩气地质调查井钻探技术研究与应用[J].钻探工程,2024,51(S1):341-347.
YIN Xin, MENG Faqiang, LI Mingxing, et al. Research and application of drilling technology for shale gas geological survey wells in Liuzhou area [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 341-347.
- [8] 张飞,代振龙,熊虎林,等.新疆页岩气小口径地质调查井钻井技术探索与实践[J].钻探工程,2025,52(S1):348-352.
ZHANG Fei, DAI Zhenlong, XIONG Hulin, et al. Exploration and practical analysis of drilling construction technology for shale gas investigation wells in Xinjiang [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 348-352.
- [9] 陈士奎,解赤栋,姜政华,等.武隆浅层页岩气大位移水平井钻井关键技术[J].钻探工程,2025,52(5):106-112.
CHEN Shikui, XIE Chidong, JIANG Zhenghua, et al. Key drilling technologies for large-displacement horizontal wells in shallow shale gas reservoirs of Wulong [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 106-112.
- [10] 赵亮,汪程林.页岩气地质调查皖含地1井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):42-47.
ZHAO Liang, WANG Chenglin. Drilling of well Wanhendi-1 for shale gas geological survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 42-47.
- [11] 闫家,刘蓓,曹龙龙,等.下扬子地区页岩气地质调查皖望地3井钻井设计与施工技术[J].钻探工程,2023,50(3):74-82.
YAN Jia, LIU Bei, CAO Longlong, et al. Drilling design and construction technology of shale gas geological survey Well Wanhendi-3 in the Lower Yangtze Block [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 74-82.
- [12] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2):324-336.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 324-336.
- [13] 郑红军,周道容,殷启春,等.下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考[J].地质力学学报,2020,26(6):852-871.
ZHENG Hongjun, ZHOU Daorong, YIN Qichun, et al. New progress and breakthrough difficulties on shale gas geological survey in the lower Yangtze area [J]. Journal of Geomechanics,

- 2020, 26(6):852-871.
- [14] 王保忠, 石万忠, 王传尚, 等. 中扬子地区下古生界页岩拉曼光谱特征及其对页岩气勘探的启示[J]. 华南地质, 2026, 42(1): 116-130.
- WANG Baozhong, SHI Wanzhong, WANG Chuanshang, et al. Raman spectral characteristics of the Lower Paleozoic shale in the Middle Yangtze Region and their implications for shale gas exploration[J]. South China Geology, 2026, 42(1): 116-130.
- [15] 朱迪斯, 赵洪波, 刘恩然, 等. 长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程难点及对策分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 11-21.
- ZHU Disi, ZHAO Hongbo, LIU Enran, et al. Shale gas drilling difficulties and their solutions in the lower reach of the Yangtze River (Anhui)[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 11-21.
- [16] 王胜建, 迟焕鹏, 庞飞, 等. 黔北正安地区页岩气钻探工程难点与对策研究[J]. 地质与勘探, 2023, 59(1): 162-169.
- WANG Shengjian, CHI Huanpeng, PANG Fei, et al. Challenges and solutions of drilling engineering in the zheng'an area of northern Guizhou Province[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(1): 162-169.
- [17] 苗凤彬, 张国涛, 张保民, 等. 湘中坳陷二叠系龙潭组页岩气富集主控因素及勘探潜力[J]. 华南地质, 2025, 41(1): 109-125.
- MIAO Fengbin, ZHANG Guotao, ZHANG Baomin, et al. Main controlling factors of shale gas enrichment and exploration potential of Permian Longtan Formation in central Hunan Depression[J]. South China Geology, 2025, 41(1): 109-125.
- [18] 樊腊生, 刘伟, 张统得, 等. 四川沐川大口径地质调查井(川沐地2井)钻探施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 43-53.
- FAN Lasheng, LIU Wei, ZHANG Tongde, et al. Drilling of a large diameter geological survey well (Well Chuanmudi-2) in Muchuan county of Sichuan province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 43-53.
- [19] 熊虎林, 张飞, 甘辉敏, 等. 页岩气调查泉参1井大口径同径取心钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6): 19-25.
- XIONG Hulin, ZHANG Fei, GAN Huimin, et al. Coring technique for shale gas survey Quancan Well-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6): 19-25.
- [20] 任正炼, 蹇黎明, 王胜, 等. 页岩气钻探胶凝时控水泥基护壁堵漏材料研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 115-123.
- REN Zhenglian, JIAN Liming, WANG Sheng, et al. Study on cement-based materials with controllable gelation time for wellbore protection and leakage sealing in shale gas drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 115-123.
- [21] 张统得, 樊腊生, 刘伟, 等. 页岩气调查井复杂地层有机硅聚合物钻井液体系的研制与应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 520-527.
- ZHANG Tongde, FAN Lasheng, LIU Wei, et al. Research and application of organosilicon polymer drilling fluid system in complex formation of shale gas survey well[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 520-527.
- [22] 宿振国, 王瑞和, 刘均一, 等. 高性能环保水基钻井液的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 576-582.
- SU Zhenguo, WANG Ruihe, LIU Junyi, et al. Research and application of high performance and environmentally friendly water based drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 576-582.

(编辑 王文)