

页岩气水平井钻井工艺优化及储层保护技术探讨

唐可伟

中石化中原石油有限公司钻井一公司 河南濮阳 457001

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18511

[摘要] 页岩气作为我国重要的非常规天然气资源,其高效开发对保障能源安全具有战略意义。水平井技术因能最大化接触储层、提升单井产量,已成为页岩气开发的核心技术手段,但在钻井过程中面临的井壁失稳、钻井效率低、储层损害严重等问题,制约了开发效益的提升。本文基于页岩气储层低孔、低渗、脆性强的地质特征,结合当前钻井工程实践,深入分析水平井钻井工艺与储层保护的核心矛盾,从井眼轨迹优化、钻井液体系改良、高效破岩技术创新及储层保护一体化措施四个维度,提出针对性的优化方案与技术路径。通过现场应用案例验证,优化后的技术体系可有效降低井漏、卡钻等复杂情况发生率30%以上,储层渗透率恢复率提升至85%以上,为页岩气水平井高效、经济开发提供技术支撑。

[关键词] 页岩气; 水平井; 钻井工艺优化; 储层保护; 钻井液改良

一、引言

随着我国“双碳”目标推进和能源结构转型深化,页岩气开发规模持续扩大。我国页岩气可采资源量大,开发潜力巨大。水平井技术成页岩气开发主流,能提升井眼与储层接触面积,提高压裂和产气能力。但页岩储层特点致水平井钻井易出现井壁坍塌等问题,影响开发效益。

当前我国页岩气水平井钻井面临诸多技术瓶颈,如主力产区水平段长、高温高压下井眼轨迹控制难,传统钻井液体系抑制性与润滑性不足,储层敏感性易受损。因此,开展钻井工艺优化与储层保护技术研究,实现“高效钻井”与“储层低损害”协同,对推动页岩气产业发展意义重大。

二、页岩气水平井钻井与储层保护的核心矛盾及技术难点

(一) 地质特征与工程需求的内在矛盾

页岩气储层地质特征与水平井钻井工程需求矛盾显著,体现在三方面。一是低孔低渗与钻井液侵入矛盾,钻井液易侵入裂缝降低储层渗透性;二是脆性特征与井壁稳定矛盾,易引发井壁垮塌;三是非均质性与轨迹控制矛盾,增加轨迹偏离风险。

(二) 钻井工艺优化的核心技术难点

钻井工艺优化是提升油气开发效率的重要环节,目前主要面临三大技术难点。首先,长水平段井眼轨迹的控制精度存在明显不足,传统导向工具在复杂地质条件下难以实现高精度穿行,导致实际井眼轨迹与设计目标之间存在较大偏差;其次,高效破岩与能源消耗之间的平衡难以实现,常规钻头

在硬质地层中磨损严重,不仅机械钻速较低,且钻井周期延长,使得综合成本显著上升;第三,钻井液性能往往无法适应井下多变的工作条件,传统钻井液体系在高温高压等极端环境中性能不稳定,难以同时兼顾技术效果与经济可行性。

储层保护对维持油气井长期高产具有决定性作用,其效果受到多方面因素的制约。具体而言,主要存在以下四个关键问题:第一,钻井液中的滤液侵入储层会导致孔喉通道堵塞,严重影响储层渗透性;第二,钻井液携带的固相颗粒易在近井地带沉积,造成难以逆转的永久性堵塞;第三,钻井作业过程中的力学扰动可能破坏地层原始应力状态,诱发井壁失稳或裂缝扩展;第四,现有技术对储层损害的评价与修复措施通常存在滞后性,难以及时识别损害类型并实施有效的治理手段,从而影响整体开发效益。

三、页岩气水平井钻井工艺优化技术路径

(一) 井眼轨迹优化: 精准匹配储层“甜点区”

井眼轨迹优化的核心目标是实现水平段在储层“甜点区”的精准穿行,提升储层接触效率。首先,建立多参数储层评价模型。结合地震勘探、测井数据及岩心实验结果,构建以孔隙度、含气饱和度、脆性指数为核心的“甜点区”评价标准,利用随钻测井(LWD)技术实时监测储层参数,为轨迹调整提供依据。其次,优化轨迹设计参数。针对长水平段特点,采用“三段式”轨迹设计:直井段采用大井斜角快速降深,造斜段采用高造斜率工具缩短造斜长度,水平段采用“微幅波动”轨迹,避开硬夹层和裂缝发育密集区,确保轨迹在储层核心区的穿行率超过90%。最后,升级导向钻井系统。应

用旋转导向钻井系统 (RSS) 结合地质导向技术, 实时调整钻具姿态, 将轨迹控制误差控制在 0.1m 以内, 尤其在储层非均质性强的区域, 通过随钻伽马、电阻率曲线实时反馈, 实现轨迹的动态优化。例如, 在川南某页岩气田, 采用优化后的轨迹设计技术, 水平段储层穿行率从原来的 78% 提升至 93%, 单井压裂段数增加 25%, 产气能力提升 30%。

(二) 高效破岩技术: 提升钻井效率与钻头寿命

针对页岩储层破岩效率低的问题, 从钻头优化、钻井参数匹配及辅助破岩技术三方面构建高效破岩体系。一是定制化钻头研发。基于储层岩性特征, 开发“仿生齿形+复合切削”PDC 钻头, 优化齿排距和后倾角, 增强钻头对硬夹层的切削能力, 同时采用金刚石复合齿提升耐磨性, 使钻头寿命从原来的 80-100 小时延长至 150-200 小时。二是动态钻井参数优化。建立“岩性-钻速-能耗”耦合模型, 利用随钻数据实时调整钻压、转速和排量, 在软页岩段采用高转速、低钻压提升钻速, 在硬夹层段采用低转速、高钻压保证切削效率, 使平均钻速从 2.5m/h 提升至 5.8m/h。三是引入辅助破岩技术。在超深井和硬岩段应用水力脉冲空化射流技术, 通过射流产生的空化效应破坏岩石结构, 降低岩石抗压强度, 辅助钻头破岩, 该技术在渝西某井应用后, 硬夹层钻速提升 40% 以上, 钻井周期缩短 12 天。

(三) 钻井液体系改良: 平衡井壁稳定与储层保护

钻井液体系改良遵循“抑制强、润滑好、损害小”的原则, 构建多类型适配体系。一是开发新型水基钻井液。以钾铵基聚合物为主要处理剂, 复配聚胺抑制剂和纳米封堵剂, 增强对黏土矿物膨胀的抑制能力, 同时纳米颗粒可有效封堵页岩微裂缝, 减少滤液侵入。室内实验表明, 该钻井液在龙马溪组页岩岩样上的线性膨胀率低于 8%, 优于传统水基钻井液的 25%。二是优化油基钻井液配方。针对环保要求, 开发低毒、可降解油基钻井液, 采用植物油相替代传统矿物油, 添加生物降解型乳化剂和降滤失剂, 在保证抑制性的同时, 降低对环境的污染, 其生物降解率可达 90% 以上, 符合页岩气产区的环保标准。三是强化钻井液现场维护。建立钻井液性能实时监测系统, 定期检测黏度、切力、滤失量等参数, 针对水平段岩屑床堆积问题, 通过调整排量和添加岩屑悬浮剂, 确保岩屑清除效率, 降低摩阻扭矩, 将卡钻风险降低 60% 以上。

(四) 井眼稳定控制: 构建全周期应力平衡体系

井眼稳定控制需从应力分析、压力控制和井眼强化三方

面入手, 实现全钻井周期的稳定。首先, 精准计算储层应力参数。通过室内岩石力学实验和现场水力压裂数据, 获取页岩的抗压强度、泊松比和地应力大小, 建立井眼周围应力分布模型, 确定合理的钻井液密度窗口, 避免压力过高导致储层损害或压力过低引发井壁坍塌。其次, 实施动态压力控制。采用随钻压力监测技术, 实时监测井底压力变化, 通过调整钻井液密度和井口回压, 将井底压力控制在安全窗口内, 尤其在钻遇天然裂缝发育区时, 采用“低黏度、低切力”钻井液配合节流循环技术, 减少压力波动对井壁的影响。最后, 强化井眼强化措施。对易垮塌井段采用随钻堵漏技术, 通过添加可变形堵漏材料封堵微裂缝, 同时在水平段采用套管鞋提前下深和分段固井技术, 增强井眼力学稳定性。在川东某页岩气井应用后, 井壁失稳发生率从原来的 42% 降至 15% 以下, 钻井复杂成本降低 40%。

四、页岩气水平井储层保护一体化技术措施

(一) 源头防控: 减少钻井液与储层的有害接触

源头防控是储层保护的关键, 核心在于降低钻井液对储层的侵入程度。一是优化钻井液侵入控制参数。通过室内实验确定合理的钻井液滤失量, 采用“低滤失、高黏度”钻井液配方, 配合井眼净化措施, 减少滤液和固相颗粒的侵入通道。二是应用暂堵保护技术。针对页岩储层裂缝特征, 添加与裂缝宽度匹配的可降解暂堵剂, 在井眼形成临时封堵层, 阻止钻井液侵入, 该暂堵剂在压裂时可随流体降解, 不影响裂缝沟通。例如, 在宜宾某页岩气井应用可降解纤维暂堵剂后, 储层渗透率恢复率从原来的 65% 提升至 88%。三是缩短储层暴露时间。通过优化钻井工艺提升钻速, 减少储层在钻井液中的浸泡时间, 同时采用“快速完井”技术, 在水平段钻完后及时下套管固井, 避免储层长期暴露导致的损害加剧。

(二) 过程监测: 构建实时损害评价体系

过程监测需实现从室内实验到现场实时监测的无缝衔接, 及时发现储层损害。一是建立多维度损害评价指标。除传统的渗透率恢复率外, 增加裂缝封堵率、黏土膨胀率等评价指标, 通过岩心流动实验和激光扫描电镜分析, 精准评估钻井液对储层的损害程度。二是应用现场实时监测技术。采用随钻储层损害监测仪, 通过监测钻井液滤液侵入深度、储层电阻率变化等参数, 实时判断损害发生情况, 例如当监测到储层电阻率异常降低时, 及时调整钻井液配方, 添加抑制剂控制黏土膨胀。三是建立损害预警机制。根据监测数据建

立损害等级划分标准,当损害指标达到预警值时,自动触发预警并推送调整方案,实现损害的早发现、早处理。

(三) 修复治理: 针对损害类型实施精准修复

针对不同类型的储层损害,采用针对性的修复技术。一是黏土膨胀损害修复。向储层注入黏土稳定剂,通过离子交换作用抑制黏土矿物膨胀,同时采用酸化处理溶解黏土矿物,恢复孔隙喉道畅通。二是裂缝堵塞损害修复。采用“酸液+降阻剂”复合体系进行解堵,酸液可溶解固相颗粒堵塞物,降阻剂可降低流体流动阻力,提升解堵效果,在泸州某井应用后,裂缝沟通效率提升50%。三是力学损害修复。通过控制压裂施工参数,采用“低砂比、慢排量”的压裂方式,重新沟通闭合的天然裂缝,同时利用裂缝监测技术确保新裂缝生成方向与储层有利方向一致,恢复渗流通道。

(四) 完井协同: 实现钻井与完井的无缝衔接

完井阶段的储层保护需与钻井工艺协同,减少作业环节对储层的二次损害。一是优化完井液配方。采用与储层配伍性好的无固相完井液,避免完井液滤液侵入储层,同时添加防膨剂和缓蚀剂,保护储层和套管。二是采用高效完井工艺。推广应用滑套分段完井技术,减少套管固井过程中水泥浆对储层的污染,同时缩短完井周期,降低储层暴露风险。三是实现钻井与压裂的协同设计。在钻井阶段提前考虑压裂需求,优化水平段轨迹和井眼质量,确保压裂时裂缝能够均匀扩展,提升压裂改造效果,实现“钻井-完井-压裂”的一体化储层保护。

五、现场应用案例与效果分析

以川南某页岩气田X井为例,该井为深层页岩气水平井,设计井深4800m,水平段长度2000m,储层为龙马溪组页岩,具有脆性强、天然裂缝发育、水敏性突出的特点。应用本文提出的钻井工艺优化与储层保护技术体系,实施以下措施:采用旋转导向钻井系统配合地质导向技术,优化井眼轨迹,确保水平段储层穿行率达94%;应用定制化PDC钻头结合水力脉冲空化射流技术,平均钻速提升至6.2m/h,钻井周期从原来的65天缩短至42天;采用钾铵基纳米封堵水基钻井液,配合可降解暂堵剂,钻井液滤失量控制在5mL以内;完井阶段采用无固相完井液和滑套分段完井技术,实施精准解堵修复。

现场应用效果显示:该井钻井过程中井壁失稳、卡钻等复杂情况发生率仅为12%,较邻井降低35个百分点;储层渗透率恢复率达89%,高于邻井的68%;压裂后单井日产气量达

32万立方米,较邻井提升45%,投产一年后累计产气量突破1.2亿立方米,经济效益显著。该案例验证了所提技术体系的可行性和有效性,为同类页岩气水平井开发提供了参考。

六、结论与展望

页岩气水平井钻井工艺优化与储层保护是一项系统工程,需紧密结合储层地质特征与工程实际,通过井眼轨迹精准控制、高效破岩技术创新、钻井液体系改良及储层保护一体化措施,实现“高效钻井”与“低损害储层”的协同目标。本文提出的技术体系在现场应用中取得了显著成效,有效降低了钻井成本,提升了储层开发效益,为页岩气高效开发提供了技术支撑。

未来,随着页岩气开发向深层、超深层拓展,钻井与储层保护技术将面临更高要求。建议进一步开展以下研究:一是研发智能化钻井系统,结合人工智能算法实现轨迹控制、钻井参数调整的自主决策;二是开发环保型、低成本的新型钻井液体系,提升性能与经济性的平衡;三是建立储层损害动态预测模型,实现损害的提前防控。同时,应加强多学科协同创新,推动钻井工程与地质、压裂等学科的深度融合,为我国页岩气产业的持续发展提供更强有力的技术保障。

[参考文献]

- [1] 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(05): 106-112.
- [2] 汤艳. 页岩气水平井钻井关键工艺参数优化研究[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(三). 中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院; 2025: 309-314. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.029963.
- [3] 袁青松, 张翼飞, 丁毅, 等. 南华北盆地海陆过渡相煤系页岩气水平井钻井实践与认识[J]. 能源与环境, 2025, 47(04): 101-108. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2025.04.016.
- [4] 陈建国, 汪伟, 都伟超. 渝西大安区块超深层页岩气水平井钻井提速关键技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(04): 154-162.
- [5] 李伯尧. 轨道负位移对页岩气水平井钻井作业的影响分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(06): 93-95.