

涪陵页岩气田立体开发加密井定向钻井技术 难点与解决方案

廖若君¹, 胡云锋², 王建斌¹, 崔 森¹

(1. 中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司, 湖北 武汉 430000; 2. 中石化江汉石油工程有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 三层立体开发模式下, 涪陵页岩气田采收率显著提升, 焦石坝区块采收率从 12.6% 提升至 23.3%。但在密集井网条件下, 定向钻井存在诸多难题: 井口间距小 (6~8 m), 平台井直井段防碰风险高; 大型压裂导致储层应力场动态重构, 同时施工需兼顾剩余气甜点识别与压裂干扰控制; 三维轨道设计与高密度井网叠加致使水平段 300 m 间距内轨迹防碰控制难度倍增。本研究提出基于分离系数的常规加密井轨道优化设计方法, 并建立压裂干扰区靶点动态调整技术, 形成适用于复杂应力场的三维绕障钻井工艺体系。工程实践表明, 该技术体系有效解决了密集布井条件下的三维轨迹防碰难题, 为页岩气高效开发提供了重要技术支撑。

关键词: 立体开发; 定向钻井; 分离系数; 压裂干扰; 三维轨道设计

中图分类号: TE243; P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0149-07

Technical challenges and solutions of directional drilling for infill wells in three-dimensional development: A case study from Fuling Shale Gas Field

LIAO Ruojun¹, HU Yunfeng², WANG Jianbin¹, CUI Miao¹

(1. Shale Gas Development Technical Service Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Wuhan Hubei 430000, China; 2. Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: Under the three-layer three-dimensional development mode, the recovery rate of Fuling Shale Gas Field has significantly increased, and the recovery rate of Jiaoshiba block has increased from 12.6% to 23.3%. However, in the process of three-dimensional development of directional drilling, there are many problems: The wellhead spacing is small (6~8 m), and the risk of collision prevention in the vertical section of the platform well is high; Large-scale fracturing leads to the dynamic reconstruction of the reservoir stress field, and the construction needs to take into account the identification of residual gas sweet spots and the control of fracturing interference; The three-dimensional track design and the superposition of high-density well pattern make it difficult to control the trajectory collision within the 300 m spacing of the horizontal section. In this study, a conventional infill well track optimization design method based on separation coefficient was proposed, and a dynamic adjustment technology for targets in the fracturing disturbance zone was established to form a three-dimensional obstacle drilling technology system suitable for complex stress fields. The engineering practice shows that the technical system effectively solves the problem of three-dimensional trajectory collision prevention under the condition of dense well placement, and provides important technical support for the efficient development of shale gas.

Key words: three-dimensional development; directional drilling; separation factor; fracturing interference; three-dimensional trajectory design

收稿日期: 2025-08-29; 修回日期: 2025-11-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.017

基金项目: 中石化石油工程技术服务有限公司项目“涪陵页岩气‘瘦身型’水平井钻完井关键技术研究”(编号: SG2012-05K)

第一作者: 廖若君, 男, 汉族, 1995年生, 助理研究员, 石油与天然气工程专业, 硕士, 研究方向为钻井工程, 湖北省武汉市洪山区高新大道 807 号, liaorj67481.osjh@sinopec.com.

引用格式: 廖若君, 胡云锋, 王建斌, 等. 涪陵页岩气田立体开发加密井定向钻井技术难点与解决方案[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 149-155.

LIAO Ruojun, HU Yunfeng, WANG Jianbin, et al. Technical challenges and solutions of directional drilling for infill wells in three-dimensional development: A case study from Fuling Shale Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 149-155.

0 引言

随着页岩气开发的逐步深入,立体开发模式已成为提高储量动用效率的核心技术路径之一。涪陵页岩气田作为我国首个实现商业开发的复杂山地页岩气藏^[1-2],通过井间-层间立体加密井网部署,显著提升了龙马溪组-五峰组多小层资源的综合开发效益^[3-5]。涪陵页岩气田焦石坝区块开发初期,主要以龙马溪组①—⑤小层为目的层,井间距为600 m^[6]。立体开发阶段,开展同层加密布井和层间加密布井,针对前期①—⑤小层同层开发并未动用的区域,实施同层加密开发,采用300 m井距进行加密布井;针对⑥—⑨小层,实施错层开发,通过错层加密布井,实现未动用层位效益开发。当前,焦石坝区块已完成了600余口井,区块采收率大幅度提升,整体采收率提高84.92%,三层立体开发区采收率高达44.6%^[7-9],有效助力了涪陵页岩气田100亿m³产能建设。

立体开发技术虽助力气田高效开发,但在钻井过程中仍然存在诸多难题:(1)立体开发区井口间距6~8 m,导致直井段防斜打直、防碰绕障难度高,碰套管风险激增^[10];(2)立体开发后,井网、缝网更加复杂,剩余气的不均匀分布,导致地层能量改变,储层应力场动态重构,地层压力系统紊乱,定向施工过程中兼顾剩余气储层甜点与防压裂干扰难度大^[11];(3)层间交错布井致使传统二维轨道设计方法已无法满足安全钻井需求,三维轨道叠加高密度井网,导致造斜段定向施工难度提升,水平段300 m井距内轨迹三维防碰难度大。

针对上述难题。笔者分析总结了涪陵页岩气田立体开发井网定向钻井施工技术难题,在此基础上,提出了常规加密井轨道优化设计和压裂干扰区轨道设计优化方法,形成涪陵页岩气田定向钻井关键技术,支撑涪陵页岩气田高效开发。

1 定向钻井技术难点

1.1 密集井网下轨道设计及控制难度大

涪陵页岩气田加密井主要依托既有的丛式井平台进行二次开发,井口多批次叠加部署,呈现密集分布(井间距6~8 m)且无规则排列的特征。基于储量动用最大化开发准则,工程实践中创新性采用交叉式全覆盖布井技术^[12-13]。纵向上,加密井与上部地层井眼保持30~60 m的安全厚度;横向上,

同层平面间距为300 m,错层平面间距75~150 m。正是由于多期次开发,同平台地下井网复杂,新井轨道设计过程中,需在密集井网中穿行,防碰绕障难度大;同时平面上,水平段同层间距小,叠加地层产状变化,实钻过程中,轨迹纵向调整幅度有限,方位变化要求较高^[14]。

(1)直井段防碰绕障难度大。为满足低成本效益开发,当前直井段钻井过程中,主要以LWD/MWD为导向方式,进行井斜方位测量,但零长和仪器测量精度严重制约了实钻过程中的测量精度;同时立体开发区直井段井间距仅为6~8 m,叠加多期次工厂化密集井网,导致直井段防碰绕障难度剧增;再者当前为实现直井段防碰绕障,造斜点上移,致使后续井段定向钻进难度极大^[15]。

(2)水平段轨迹调整空间受限。立体加密井网,水平段同层间距小,层内优质储层厚度薄,产状变化大,导致水平段轨迹调整幅度有限,致使兼顾甜点穿行率与水平段绕障需求难度大^[16]。

(3)涪陵页岩气田直井段过路层厚,层系多,地层岩性、产状变化较大,导致钻井过程中同套钻具组合及钻井参数下,造斜趋势变化较大,难以实现轨迹的精准控制,同时直井段采用单、多点仪器测斜时,往往因测斜盲区过长,未能及时发现方位突然变化,无法做到实时防碰控制。

1.2 大规模压裂影响正钻井井筒安全性

(1)大规模压裂后,大量压裂液进入地层,导致局部地层压力剧增,同时,立体开发区老井长期开采后,局部地层出现压力亏空,且地应力方向随着开发逐步发生改变,导致轨道方向设计需针对性的改变,但在密集井网空间内,调整的空间受限。同时协同考虑异常低压、异常高压、压裂裂缝干扰区以及剩余气甜点区的水平段轨道设计及控制难度大。

(2)常规压裂作业单井液量>50000 m³,施工压力60~90 MPa,高压注入流体将补充地层能量,显著提升孔隙压力,致使气体通过裂缝进入正钻井,地层压力发生改变,可能发生气侵、溢流等井下工况。

(3)井区规模化压裂后,随着裂缝网络的扩展,目的层波及区渗透率会逐渐增大。如表1所示,实钻过程中,受压裂干扰井钻井液密度升高,对于同一平台的1井和2井,受压裂干扰渗透率和钻井液

密度显著提升。

表1 压裂干扰下渗透率和钻井液密度变化情况
Table 1 Permeability and drilling fluid density variations under fracturing interference

井号	渗透率/md	钻井液密度/ (g·cm ⁻³)
2井(未受压裂干扰)	0.2	1.4
1井(受压裂干扰)	0.4	1.48~1.5

(4)加密井水平段间距小,井区规模化压裂后,裂缝波及范围扩大,同时井区地层压力会随着压裂液的注入而逐渐增大,这就导致邻井压裂施工的同时,加密井钻井过程中,极易导致压裂液窜流,进入正钻井井筒,污染钻井液体系,影响体系破乳电压、黏度等,造成井壁失稳掉块,严重影响井下安全。

2 定向钻井关键技术与对策

2.1 直井段轨道设计与控制技术

2.1.1 轨道设计技术

为解决高密度井网下,直井段井间距小,防碰压力大,施工难度高等问题,优化直井段轨道设计。直井段采用预增斜设计,造斜点上移,二开钻进出一开套管鞋后,在飞仙关组开始造斜,采用1.80~2.40(°)/30 m造斜率施工,提前增斜,预增斜井斜角设计为3°~6°,实现绕障,同时低造斜率施工,降低狗腿度,降低下部井段施工过程中的井下摩阻;在施工过程中,对井斜数据进行多点测量,配合弯螺杆工具与随钻测量系统实时进行轨迹调整。结合涪陵页岩气田地质特点,垂深1000 m内的直井段安全间距<10 m,2000 m以内的保持在15~20 m,保证施工的安全性与可行性。

在直井段下部,随着测量深度的增加,井斜和方位的测量误差累积增加。针对此井段,优选分离系数法进行轨迹的防碰分析,见图1。分离系数主要是用来量化两口定向井误差椭圆之间的相对位置关系,是中心距与各自误差椭圆半径之和的比值,考虑了井眼位置的不确定性,提高了判断的准确性。据实钻分析,涪陵页岩气田的分离系数阈值分别为1、2、5,当计算得出的分离系数>5,则表示无井眼相碰风险;当计算得出的分离系数<2,则表示井眼相碰风险较高,钻进过程中需进行定向绕障。

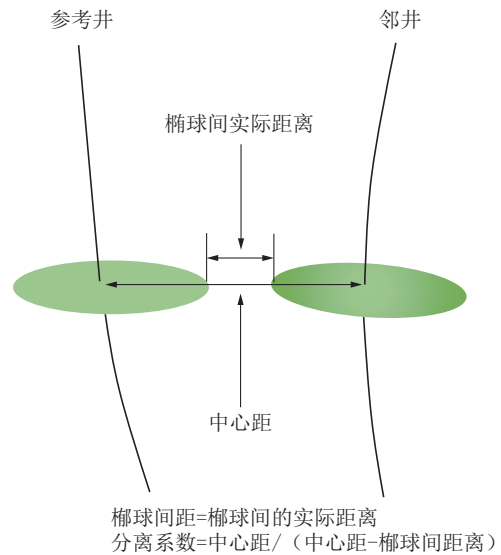


图1 传统防碰扫描示意

Fig.1 Traditional anti-collision scanning

2.1.2 直井段绕障钻具组合优化

加密井通常需要进行绕障设计,在完成预增斜3°后,还需进行纠偏控制,通过钻具组合动力学特性分析,研究预弯曲钻具组合在直井段纠偏控制规律。

室内物模试验表明:当设置钻压为100 kN,转速为60 r/min,底部钻具组合具有较规则的涡动特征,涡动在钻头上形成了大小不一致但具有很强的规律性的侧向冲击载荷,且对上井壁的冲击载荷明显小于对下井壁的冲击载荷,这种动态冲击载荷的不均衡性使钻具组合具有较好的防斜能力,见图2。

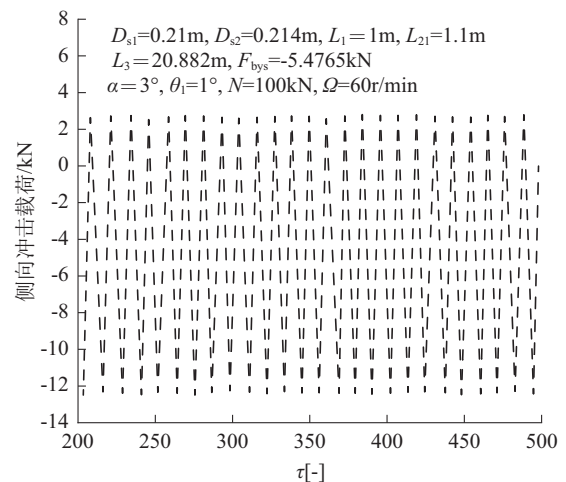


图2 钻头侧向冲击载荷时程曲线

Fig.2 Time-history curve of lateral impact load on drilling bit

分析结果表明:预弯曲钻具组合在小井斜角条件下复合钻井时的合导向力表现为降斜力,该力远大于常规钟摆钻具组合的降斜力。因此在直井段纠偏井段推荐采用预弯曲钻具组合^[17],设计方案如下:

Ø311.2 mm 钻头+Ø228.6 mm/Ø244.5 mm×1°/1.25°单弯螺杆+Ø300 mm 扶正器+浮阀+Ø203.2 mm 无磁钻铤×1根+LWD无磁悬挂短节+Ø203.2 mm 钻铤×1根+Ø177.8 mm 钻铤×2根+Ø127 mm 加重钻杆×30根+Ø127 mm 钻杆。

2.2 压裂干扰区轨道设计优化

2.2.1 建立动态孔隙压力求取模型

页岩储层具有纳米孔隙发育、超低渗的特点,基质内部气体不流动,天然裂隙成为气体运移的主要通道。现场数据证实,钻井与压裂过程中注入的流体,可明显提升孔隙压力。同时,邻井长期生产后会导致裂缝波及区域地层能量亏空,新井压裂液的规模注入诱发地层能量增大,压裂裂缝规模扩展导致井周缝网复杂化,三者均会形成压裂干扰区,加剧井壁失稳、漏失等井下风险。现场实践表明,受压裂干扰的井在钻进过程中需优化钻井液密度以平衡地层压力,同时,渗透率也有显著提高^[18]。

基于有效应力原理,考虑压裂后地层孔隙压力会受到多因素的影响而发生改变,通过仿真分析,引入上覆岩层压力、岩石骨架应力以及压裂后井区渗透率的变化率,形成下列地层孔隙压力计算模型:

$$P_{pd} = \sigma_v - (Ae^{bV_p/V_s} + Ce^{d\mu}) + Ee^{bV_p/V_s} e^{K^n} \quad (1)$$

式中: P_{pd} ——地层孔隙压力,MPa; σ_v ——上覆岩层压力,MPa; V_p ——纵波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; V_s ——横波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; μ ——泊松比; K^n ——地层渗透率的变化率,计算钻井过程中的孔隙压力时采用 K_m/K ; K_m ——地层渗透率; K ——基质渗透率,压裂施工后采用 K_c/K_m ; K_c ——压裂后的等效渗透率; A 、 C 、 E 、 d 、 b 、 f ——区域常数,可由压裂前后地层压力测试结果验证求取。

2.2.2 压裂对地应力及地层三压力的影响

通过井区裂缝仿真建模,分析人工缝网区地应力的影响,可得:

(1)密集缝网区,人工裂缝主要影响裂缝间的地应力,在裂缝的尖端,会产生地应力的放大效应,同时在裂缝的两侧,地应力的方向会发生改变^[19]。

(2)通过模拟分析,沿裂缝缝长方向,范围

150~175 m,存在应力扰动,沿井筒轴线方向,距离为50 m内,地层压力会受到压裂裂缝波及,超出该距离后,坍塌压力不再受其影响;沿井筒的缝长方向上,范围为80 m内,地层压力会受到压裂裂缝波及,当超过150 m时,坍塌压力不会受影响;垂向方向上,距离为50 m,孔隙压力受压裂裂缝波及。

(3)压裂影响取决于邻井的生产压力,当邻井的生产压力降幅 >10 MPa时,前期压裂的影响可以忽略不记,垂向间距 >50 m的区域,上部气层不受压裂波及区的干扰。

2.2.3 轨道设计优化

结合压裂对地应力和地层三压力的影响分析,可得轨道设计防压裂干扰安全距离:轨道设计应避免压裂施工后地层压力降幅 <10 MPa的区域(以裂缝延伸半长扩展50 m为界定范围)^[20];同层加密布井设计轨道与邻井的水平间距需超过裂缝垂向扩展高度(一般取50 m标准值);对于相邻次序施工井,若一口井的A靶点与邻井的B靶点或A靶点存在位置交叠,在垂直及水平方向上需分别保持至少50 m和80 m的安全距离。

在确定密集井网正钻井的压裂干扰安全距离后,针对同一口井,开展轨道设计,通过基于摩阻、完钻井深、扭方位值等关键参数对比,分析了绕障轨道设计与靶点调整两种绕障轨道设计方法,适用性评价结果如下:

采用绕障轨道设计,钻井施工技术难度较高,达到相同的靶点所钻井段较长,且钻井过程中摩阻较大,滑动钻进井段较长,钻井周期相较原设计有所增加,钻井效率低,工程上难以实现。采用靶点调整方案对施工要求较低,通过不同位移对比可以看出,井深增加 <100 m,扭方位角增加 $<20^\circ$,摩阻增加量 <40 kN。因此,在协同考虑井区目的层地质条件下,靶点调整方式更为适合压裂干扰区井眼轨道设计,见表2、表3。实钻过程中,采用动态分离系数法。在垂向错层防碰上:当垂向距离 >15 m时,可放宽水平间距,利用地质导向控制轨迹与邻井错层钻进,避免同层相碰;在水平同层防碰上,当水平段同层且分离系数 ≤ 1.5 时,强制平移靶点,确保分离系数 >1.5 或垂距 >15 m。

3 典型井施工案例

JYA-1HF井与同平台的邻井槽口距离为10 m,

表2 绕障轨道设计效果
Table 2 Design effectiveness of obstacle-avoiding trajectory

轨道	井深/m	滑动钻进段长/ m	扭方位角/ (°)	摩阻/kN
原始设计	5832	233	50	140
绕障轨道	6034	352	120	190

采用中心距法对一开井段进行防撞扫描,测定结果显示两口井的最近距离 12.95 m,但随着轨迹的延伸,两口井的距离逐步增大;采用分离系数法进行计算,预测 JYA-1HF 井二开轨迹井深 1121 m 时,与邻井的最近距离为 6.91 m,分离系数为 1.37,处于中风险状态,存在碰撞可能,因此需进行绕障,轨道设计如表 4 所示。二开初期,通过下入定向仪器,开展

表3 不同靶点位移下轨道设计效果
Table 3 Trajectory design effectiveness under different target point displacements

位移方向	靶点位移/m	井深/m	扭方位角/(°)	稳斜角/(°)	摩阻/kN
基准	0	4295	0	27	122
	50	4296	6.1	27.4	128
	100	4300	12.1	27.8	143
轴移	150	4306	17.9	28.4	157
	50	4319.3		30.8	131
	100	4346.1		34.1	142
	150	4375.3		37.1	154

绕障施工,作业完成后,防撞扫描显示,两口井的距离逐渐增大。

表4 JYA-1HF井绕障轨道设计
Table 4 Well JYA-1HF obstacle-avoiding orbit design

测深/m	井斜/(°)	网格方位/(°)	垂深/m	北坐标/m	东坐标/m	视平移/m	狗腿度/[$(^{\circ}) \cdot (30 \text{ m})^{-1}$]	备注
0	0	340	0	0	0	0	0	
1000	0.5	340	999.99	4.1	-1.49	4.1	0.01	
1500	30.51	345	1476.3	131.68	-35.88	131.68	1.8	二开定向绕障
1600	30.51	0.88	1562.6	181.66	-42.07	181.66	2.41	
1698.44	30.51	1.43	1647.41	231.63	-41.06	231.63	0.09	
3418.34	30.51	1.43	3129.17	1104.53	-19.27	1104.53	0	
3500	39.23	16.61	3196.23	1150.17	-11.34	1150.17	4.5	
3600	51.64	28.55	3266.4	1215.28	16.6	1215.28	4.5	
3700	64.89	36.86	3318.94	1286.35	62.76	1286.35	4.5	
3824.54	81.88	45	3354.48	1375.85	140.86	1375.85	4.5	A靶
3900	81.88	45	3365.14	1428.68	193.69	1428.68	0	
5420	81.88	45	3579.83	2492.7	1257.71	2492.7	0	

JYB-Z1HF 井是部署在焦石坝断背斜的一口加密井,采用防撞扫描分析该井原轨道设计与 JYC-S1HF 井水平段中心距最小为 31.3 m,判断 JYB-Z1HF 井存在 JYC-S1HF 井的压裂干扰。应用靶点调整方法,优化 JYB-Z1HF 井设计轨道,A 靶点前移 100 m(见表 5),最近防撞距离为 83.7 m,井深增加 60 m,模拟摩阻增加 50 kN,实钻过程中未发生溢流、井漏等问题。

JYD-5 井是部署在焦石坝断背斜的一口层间加密井,开发龙马溪组④—⑥小层,完钻井深为 5220 m,受错层已压裂井影响,通过计算目的层地层孔隙压力系数为 1.33,实钻钻井液密度为 1.43~

1.45 kg/L,顺利完钻,无井漏、井垮等复杂发生。

4 结论与建议

(1)立体开发后,井网密集,导致钻井过程中直井段防撞绕障难度大,水平段轨迹调整空间受限;大规模压裂致使井区地应力、地层压力、渗透率等地层特性改变,同时压裂液窜流风险增加,导致井漏、井垮、溢流等井下复杂频发。

(2)针对加密井的施工难点,直井段采用预增斜轨道设计,配合分离系数法以及预弯曲钻具组合,开展直井段防撞绕障;受压裂干扰影响的井,采用动态求取方法计算地层孔隙压力,并通过靶点平

表5 JYB-Z1 HF井设计轨道数据(优化后)
Table 5 Well JYB-Z1 HF designed trajectory data (optimized)

测深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	狗腿度/[(°)·(30 m) ⁻¹]	备注
0	0	0	0	0	0	0	
500	0.5	230	499.99	-1.4	-1.67	0.03	
1500	1.5	230	1499.83	-12.62	-15.04	0.03	
1728.38	35.26	182.89	1713.62	-82.47	-20.82	4.5	
2591.51	35.26	182.89	2418.39	-580.14	-45.92	0	
2952.45	89.35	180	2580	-887.9	-51.6	4.5	A靶
5952.64	89.35	180	2614	-3887.9	-51.6	0	B靶

移调整井眼轨道,避开压裂干扰,不增加施工难度。

(3)建议加强立体开发井区钻井地质特征研究,厘清开发后期地应力、地层三压力、孔隙度、裂缝分布等关键地质特征,进而有效指导钻井工程设计及施工;同时,针对新区,强化一次井网部署研究,明确关键布井参数,可最大限度地避免后期加密井开发过程中压裂干扰等一系列工程技术难题。

参考文献(References):

- [1] 张金成.第一性原理思维法在页岩气革命中的实践与启示[J].钻探工程,2022,49(2):1-8.
ZHANG Jincheng. First principle thinking promotes innovation of shale gas revolution[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 1-8.
- [2] 张金成.涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):1-8.
ZHANG Jincheng. Optimal and fast drilling technology for horizontal wells in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7): 1-8.
- [3] 蔡勋育,周德华,赵培荣,等.中国石化深层、常压页岩气勘探开发进展与展望[J].石油实验地质,2023,45(6):1039-1049.
CAI Xunyu, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Development progress and outlook of deep and normal pressure shale gas of SINOPEC[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(6): 1039-1049.
- [4] 孙焕泉,蔡勋育,胡德高,等.页岩气立体开发理论技术与实践——以四川盆地涪陵页岩气田为例[J].石油勘探与开发,2023,50(3):573-584.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, HU Degao, et al. Theory, technology and practice of shale gas three-dimensional development: A case study of Fuling Shale Gas Field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 573-584.
- [5] 宋明阶,彭光宇,胡春阳,等.涪陵页岩气田加密井轨道优化设计技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):11-16.
SONG Mingjie, PENG Guangyu, HU Chunyang, et al. Infill well 3D horizontal wellbore trajectory optimization design method in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(5): 11-16.
- [6] 牛新明.涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J].石油钻探技术,2014,42(4):1-6.
NIU Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 1-6.
- [7] 路智勇,刘莉,姜宇玲,等.涪陵气田立体开发地质工程一体化实践[J].中国石油勘探,2024,29(3):10-20.
LU Zhiyong, LIU Li, JIANG Yuling, et al. Practice of geology and engineering integration in the stereoscopic development of Fuling Gas Field[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 10-20.
- [8] 孙焕泉,路智勇,刘莉,等.四川盆地涪陵页岩气立体开发区压裂后取心技术与认识[J].石油勘探与开发,2025,52(3):653-664.
SUN Huanquan, LU Zhiyong, LIU Li, et al. Technology and understanding of post-fracturing coring in three-dimensional development zone of Fuling shale gas, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 653-664.
- [9] 郭旭升,张宇,刘超英,等.中国石化“十四五”油气勘探理论技术进展、挑战与发展方向[J].中国石油勘探,2025,30(1):1-15.
GUO Xusheng, ZHANG Yu, LIU Chaoying, et al. Theoretical and technological progress, challenges, and development directions of petroleum exploration of Sinopec during the 14th Five-year Plan Period[J]. China Petroleum Exploration, 2025, 30(1): 1-15.
- [10] 窦玉玲,唐志军,徐云龙,等.涪陵江东区块三维水平井优快钻井技术——以焦页91平台为例[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):55-59.
DOU Yuling, TANG Zhijun, XU Yunlong, et al. Fast drilling technology of three dimensional horizontal wells in Fuling Jiangdong block[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2): 55-59.
- [11] 张莉娜,任建华,胡春锋.常压页岩气立体开发特征及缝网干扰规律研究[J].石油钻探技术,2023,51(5):149-155.
ZHANG Lina, REN Jianhua, HU Chunfeng. Three-dimensional development characteristics and fracture network interference of atmospheric shale gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(5): 149-155.
- [12] 杨海心,朱海燕,刘尧文,等.多层多期次立体加密井组水力压

- 裂参数优化——以四川盆地页岩气三层立体开发井组为例[J].石油勘探与开发,2025,52(3):724-733.
- YANG Haixin, ZHU Haiyan, LIU Yaowen, et al. Optimization of fracturing parameters in multi-layer and multi-period cube development infill well pad: A case study on a three-layer cube development well pad of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 724-733.
- [13] 潘军,刘卫东,张金成.涪陵页岩气田钻井工程技术进展与发展建议[J].石油钻探技术,2018,46(4):9-15.
- PAN Jun, LIU Weidong, ZHANG Jincheng. Drilling technology progress and recommendations for the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(4):9-15.
- [14] 曹刚,白璐,马洪亮,等.大井丛多层系立体开发钻井一体化设计技术在HQ802建产区的研究与应用[J].石化技术,2023,30(9):32-33,3.
- CAO Gang, BAI Lu, MA Hongliang, et al. Research and application of integrated design technology for large well cluster and multilayer system stereoscopic development and drilling in HQ802 production area[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023,30(9):32-33,3.
- [15] 李亚南,于占森.涪陵页岩气田二期水平井钻井防碰绕障技术[J].石油钻采工艺,2017,39(3):303-306.
- LI Yanan, YU Zhanmiao. Collision avoidance and obstacle bypass technology for horizontal wells in the second phase of Fuling Shale Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(3):303-306.
- [16] 樊好福,臧艳彬,张金成,等.深层页岩气钻井技术难点与对策[J].钻采工艺,2019,42(3):20-23.
- FAN Haofu, ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, et al. Technical difficulties and countermeasures of deep shale gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2019,42(3):20-23.
- [17] 刘伟,何龙,胡大梁,等.川南海相深层页岩气钻井关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(6):9-14.
- LIU Wei, HE Long, HU Daliang, et al. Key technologies for deep marine shale gas drilling in southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019,47(6):9-14.
- [18] Wang Y L, Liu N N. Unstable propagation of hydraulic fractures under varying well spacing and initiation sequence of multiple horizontal wells considering shear stress shadows[J]. Engineering Computations, 2023,40(9/10):2483-2509.
- [19] 江铭,邹清腾,肖壮,等.浅层页岩气井间压窜影响因素与防治优化[J].石油实验地质,2025,47(3):693-704.
- JIANG Ming, ZOU Qingteng, XIAO Zhuang, et al. Influencing factors and prevention optimization of shallow shale gas inter-well frac-hits[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2025,47(3):693-704.
- [20] 刘衍前.涪陵页岩气田加密井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2020,48(5):21-26.
- LIU Yanqian. Key drilling technologies of infill wells in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5):21-26.

(编辑 王文)