

# 自201井区页岩气井水平段安全高效钻井技术

孙凯<sup>1</sup>, 刘化伟<sup>2</sup>, 明鑫<sup>2</sup>, 乐守群<sup>1</sup>

(1. 中石化中原石油工程有限公司钻井一公司, 河南 濮阳 457001;

2. 中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 自201井区是中石油部署在自贡市荣县地区的重点页岩气勘探开发区域, 根据该井区的钻井工程实践, 水平段工程难点主要有坍塌掉块严重、井壁稳定性差、轨迹控制困难、优质储层钻遇率低、起下钻阻卡频繁等高风险井下故障, 严重制约了安全高效施工。针对上述难题, 研选无扶螺杆优化钻具组合, 降低下部钻具组合的刚性和摩阻; 同时, 研制了可塑性变形粒子和刚性封堵材料的封堵剂复配配方, 在提高密度的基础上, 强化了油基钻井液对井壁的支撑性及封堵性, 确保了水平段安全高效钻进。实现了自201井区页岩气水平井正常完钻, 并且与前期完钻井相比, 本轮施工节约钻井周期34.12%, 优质储层钻遇率100%, 为该区块安全高效作业提供了参考, 为增储上产奠定了基础。

**关键词:** 页岩气; 水平段; 安全钻井; 无扶螺杆; 钻具组合; 封堵剂; 自201井区

**中图分类号:** TE243; P634.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2022)02-0104-06

## Safe and high-efficiency drilling technology for horizontal sections of shale gas wells in Well Block Zi-201

SUN Kai<sup>1</sup>, LIU Huawei<sup>2</sup>, MING Xin<sup>2</sup>, YUE Shouqun<sup>1</sup>

(1.No.1 Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Puyang Henan 457001, China;

2.Southwest Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Chengdu Sichuan 610000, China)

**Abstract:** Well Block Zi-201 is a key shale gas exploration and development area invested by PetroChina in the Rongxian area, Zigong city. Drilling of horizontal sections in this well block encountered many engineering challenges, mainly including serious borehole sloughing, hole instability, difficult well path control, low intersection rate of high-quality reservoirs, frequent sticking while tripping, which seriously restricted drilling safety and efficiency. In view of the above problems, the non-stabilizer mud moter was selected to optimize the BHA for reduction of the rigidity and friction of the BHA. At the same time, the compound plugging agent with plastic deformation particles and rigid plugging materials has been developed to improve the density, and strengthens the well wall support and sealing characteristics of the oil-based drilling fluid so as to ensure drilling safety and efficiency in the horizontal sections, and realize the normal completion of horizontal wells in Well Block Zi-201. Moreover, compared with previous drilling, the drilling period has been reduced by 34.12% with the effective intersection rate in high-quality reservoirs up to 100%, which provides a reference for safe and efficient drilling in the block and lays a foundation for increasing explored reserves and production.

**Key words:** shale gas; horizontal section; safe drilling; non-stabilizer mud moter; BHA; plugging agent; Well Block Zi-201

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2022-01-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.02.014

第一作者: 孙凯, 男, 汉族, 1984年生, 钻井一公司副经理, 高级工程师, 油气井工程专业, 硕士, 从事钻井工程技术研究及管理工作, 河南省濮阳市华龙区, sinopecsun@163.com。

引用格式: 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.

SUN Kai, LIU Huawei, MING Xin, et al. Safe and high-efficiency drilling technology for horizontal sections of shale gas wells in Well Block Zi-201[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 104-109.

自201井区是国内重点页岩气勘探开发区域,构造位于四川盆地威远中奥顶构造西南翼,主要目的层龙马溪组龙一<sub>1</sub>小层。前期评价和先导试验阶段共开钻11口井、完钻2口,根据前期钻井情况分析,由于龙马溪组存在断层与破碎带,地震剖面精度难以准确预判,且该区域龙一<sub>1</sub>小层从上到下共分龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>~龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>4个亚层,厚度仅0.5~1 m,微构造、破碎带及断层发育,导致施工过程中遭遇水平段井壁稳定性差、坍塌掉块严重、轨迹控制困难、优质储层钻遇率低等技术难题,多井次发生卡钻、断钻具等事故,甚至埋埋旋转导向工具和近钻头仪器,水平段安全高效施工受到严重制约<sup>[1-9]</sup>。

### 1 主要技术难点

#### 1.1 龙马溪组地层构造差异大,易失稳垮塌

龙一<sub>2</sub>亚段受构造应力作用发生塑性变形,形成弯曲褶皱的揉皱变形构造及天然裂缝发育地层易破碎掉块,是造成井壁失稳的主要原因,如图1所示。龙一<sub>1</sub>中下部层理发育,坍塌压力高,与五峰组交界处存在破碎带,同时岩石塑性较高,产生大量条状或块状掉块,如图2所示。

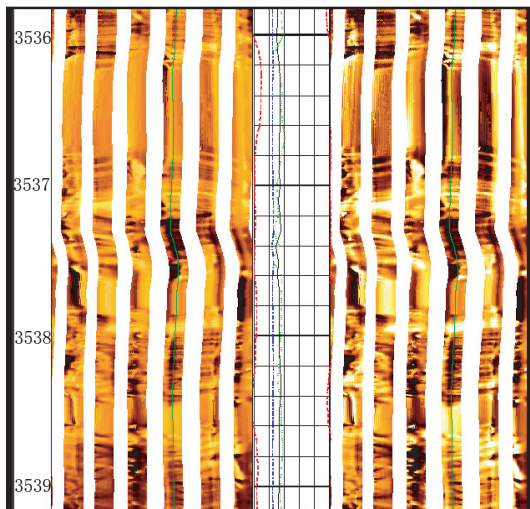


图1 自201X井龙一<sub>2</sub>段揉皱变形构造

Fig.1 Crumpled texture in Longyi Formation of Well Zi-201X

#### 1.2 井眼轨迹控制困难,优质储层钻遇率低

目的层龙马溪组龙一<sub>1</sub>箱体薄,导向施工过程中地层标志层不明确,中靶难度大。此外目的层微构造变化大,断层多,需要频繁调整井眼轨迹以保证



图2 水平段掉块

Fig.2 Falling stones in horizontal sections

优质储层钻遇率,最终导致井眼轨迹不规则。如图3所示,自2XX井水平段施工过程中,400 m水平段调整井斜多达36次,井斜最大增至104°,最小降至95°。并且3次钻遇断层,共计10次钻穿越龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>,7次穿越五峰组,1次钻进宝塔组。由此可见,复杂的地质条件以及严苛的钻遇率要求,导致了井眼轨迹不规则并且控制困难,极大地增加了井下安全风险。

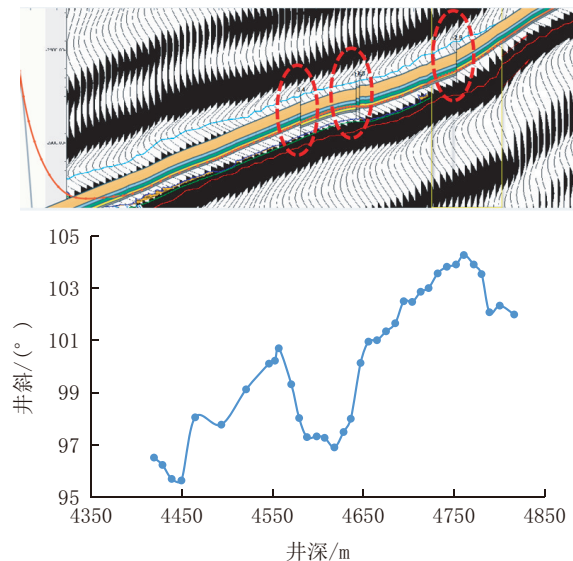


图3 自2XX井实钻轨迹调整分布及轨迹

Fig.3 As-drilled trajectory of Well Zi-2XX

#### 1.3 水平段安全钻进难度大,卡钻风险高<sup>[10-13]</sup>

(1)斯伦贝谢旋转导向工具自带扶正器外径212 mm,环空间隙小,加之钻头保径长、刀翼宽度宽,遭遇掉块时,卡钻风险高。单弯单(双)扶螺杆钻具组合同样因为携带扶正器,面临托压及卡钻风险大的难题。

表1统计了自201区块4口井水平段事故复杂时效,最高达到30.62%,最少也高达16.33%。

表1 自201井区完成井事故复杂时效  
Table 1 Drilling time efficiency of Well Block  
Zi-201 with incidents

序号	井号	水平段事故复杂时间/d	完井周期/d	水平段事故复杂时效/%
1	自2XX直改平	22.54	87.31	25.81
2	自201HL-S	30.42	186.29	16.33
3	自201HL-F	40.73	136.73	29.79
4	自201HW-L	54.65	178.50	30.62

(2) 钻井初期由于缺乏足够的地质资料,设计的油基钻井液密度偏低,而地层坍塌压力高,设计钻井液性能达不到支撑井壁的要求,造成井壁失稳,发生掉块。同时地层微裂缝发育,加之钻井液的封堵性能和抑制性能较弱,导致单纯提高钻井液密度也不能完全解决掉块、井壁失稳的难题,井壁坍塌风险较高。

## 2 主要技术对策

### 2.1 优化钻具组合

由于无扶螺杆没有扶正器且弯度非常小,因此,无扶螺杆的抗弯刚度可近似为:

$$M_{\text{无}} = EI_{\text{无}}$$

单扶螺杆的抗弯刚度近似为:

$$M_{\text{双}} = EI_{\text{单}}$$

$$I_{\text{单}} = I_{\text{扶}}L_{\text{扶}} + I_{\text{余}}L_{\text{余}}$$

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (1)$$

式中: $E$ ——弹性模量,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $I$ ——截面惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  $L$ ——长度,  $\text{mm}$ ;  $D$ ——外径,  $\text{mm}$ ;  $d$ ——内径,  $\text{mm}$ 。

$\varnothing 215.9 \text{ mm}$  井眼水平段采用  $\varnothing 172 \text{ mm}$  螺杆,长度  $7.3 \text{ m}$ ,扶正器外径  $210 \text{ mm}$ ,长度  $0.6 \text{ m}$ ,壁厚  $15 \text{ mm}$ ;因此,无扶螺杆和单扶螺杆的刚性比值  $m$  为:

$$m = \frac{EI_{\text{无}}}{EI_{\text{单}}} \approx 0.8$$

无扶螺杆的刚性仅为单扶螺杆刚性的80%,按照式(1)计算,无扶螺杆的刚性为双扶螺杆刚性的69%,因此,无扶螺杆有效降低了底部钻具组合的刚性,提高了通过微构造的能力<sup>[14-16]</sup>。

不仅如此,无扶螺杆没有扶正器与井壁或砂床之间的摩擦,无论在上、下倾井还是水平段不规则井中都会比单、双扶钻具组合的摩阻小。其次,无扶螺杆较旋转导向工具的压降小,环空间隙大,在相同条件下可以提供更大的循环排量,同时增加了岩屑和掉块流动的有效通道,有利于井底环空返砂,从而大幅度降低了井下工具的安全风险。图4为自2XX井旋导与邻井无扶螺杆使用井段的起钻摩阻对比。无扶螺杆具组合为: $\varnothing 215.9 \text{ mm}$  PDC钻头+ $\varnothing 172 \text{ mm}$   $1.25^\circ$ 无扶螺杆+止回阀+无磁承压钻杆+LWD+ $\varnothing 127 \text{ mm}$ 加重钻杆+ $\varnothing 127 \text{ mm}$ 钻杆+ $\varnothing 172 \text{ mm}$ 水力振荡器+ $\varnothing 127 \text{ mm}$ 钻杆+旁通阀+ $\varnothing 139.7 \text{ mm}$ 钻杆;旋转导向钻具组合则是将上述组合中的无扶螺杆和LWD换成旋转导向工具,同时卸掉水力振荡器。通过起钻前两柱的摩阻以及正常起钻时的摩阻对比可知,使用无扶螺杆钻具上提摩阻减少  $100 \text{ kN}$  左右。该井在完井后利用双扶通井,井下正常后套管顺利下入到位。

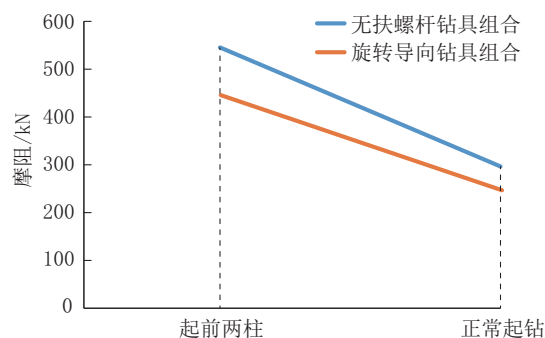


图4 无扶螺杆钻具组合与旋转导向钻具组合起钻摩阻对比

Fig.4 Comparison of drag forces between the non-stabilizer BHA and the RSS BHA

### 2.2 调整油基钻井液性能

#### 2.2.1 调整油基钻井液密度

自201井区龙马溪组预测地层压力系数  $1.50 \sim 1.84$ ,优化三开开钻钻井液密度为  $1.85 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,防止密度过低不易支撑井壁。同时根据实钻情况及时调整,将钻井液密度提高至  $2.05 \sim 2.20 \text{ g}/\text{cm}^3$  进入水平段,保证钻井过程中井壁稳定性,若钻遇井漏,在井壁稳定和井控安全的前提下适当降低密度。图5为井壁失稳与浸泡时间的关系示意图,其中,中心圆圈表示井眼,红色区域表示近井壁失稳区域。将钻井液密度提高至  $2.1 \text{ g}/\text{cm}^3$  后,即使钻井后  $16 \text{ h}$ ,井眼



附近的井壁失稳区域几乎没有扩大,高密度钻井液对井壁起到了很好的支撑作用。

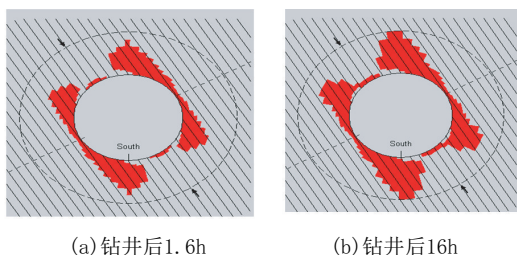


图5 自201HL-S井井壁失稳时间效应示意

Fig.5 Time effect of Well Zi-201HS-S wall failure

### 2.2.2 提高油基钻井液封堵性

针对龙马溪1号层存在破碎带,井壁易失稳的难题,通过可塑性变形粒子和刚性封堵材料的合理配比,形成的封堵层承压能力高,防塌能力强。

提高油基钻井液封堵效率的封堵剂复配方案为:不同粒径的超细钙、刚性封堵剂为固相颗粒形成较宽范围的粒径分布,盐水液滴作为体系固有,具有一定变形堵孔作用,氧化沥青和磺化沥青形成互补大幅降低泥饼渗透率,特殊封堵材料少量使用,进一步降低泥饼渗透率。同时加强防塌材料的使用,保

证球状凝胶、油基封堵剂在泥浆中的含量。

### 2.2.3 措施效果

针对自201HW-L井龙一<sup>1</sup>层初期钻井液密度1.90~1.95 g/cm<sup>3</sup>时掉块频繁、多次阻卡的问题,优化钻井液密度至2.05~2.12 g/cm<sup>3</sup>,同时调整纳米级封堵材料及润滑剂加量,加强现场钻井液封堵能力等性能维护,后续钻进过程中无掉块,表明这2项调整措施取得了良好的效果。

## 3 现场应用

上述主要技术措施在自201井区HW平台现场应用了2口井,与相邻HL平台完钻水平井对比,实钻水平段长度明显优于HL平台,平均长度超出33.46%。其中,自201HW-W井完成了设计的1700 m水平段进尺,成为该井区第一口按设计顺利完成地质、工程目标的长水平段开发水平井。

此外,如图6所示,采用无扶底部钻具组合配合地质导向轨迹控制还保证了水平段井眼轨迹平滑。从表2数据可知,针对龙一<sup>1</sup>和龙一<sup>2</sup>优质储层:自201HL-S井原井眼龙一<sup>1</sup>钻遇率仅为13.5%;侧钻井眼钻遇率为60.9%;而自201HW-W井实现了95%的龙一<sup>1</sup>钻遇率,100%的优质储层钻遇率。

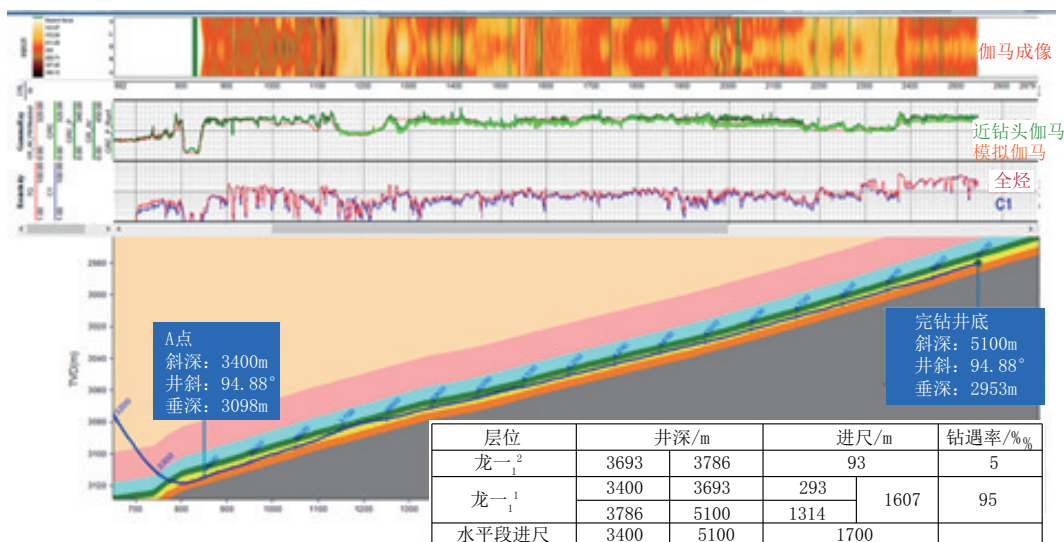


图6 自201HW-W井地质导向模型

Fig.6 Geo-steering model for Well Zi-201HW-W

除此之外,通过提高水平段排量至30 L/s、转速100 r/min以及寸提倒划等措施完善了现场施工工艺,形成了水平段防卡施工措施与遇阻处理规程,明

显降低了井下复杂与卡钻故障几概率,有效缩短了三开钻井周期。

根据自201井区完钻井三开钻井周期对比(见

表2 自201HL-S井与自201HW-W井钻遇率数据统计对比

Table 2 Comparison of the intersection rates between Well Zi-201HL-S and Zi-HW-W

地 层	HL-S(原井)		HL-S(侧钻)		HW-W	
	钻遇长度/m	钻遇率/%	钻遇长度/m	钻遇率/%	钻遇长度/m	钻遇率/%
龙一 <sub>1</sub> <sup>4</sup>	21.2	3.0	185	14.6	0	0
龙一 <sub>1</sub> <sup>3</sup>	7.0	1.0	0	0	0	0
龙一 <sub>1</sub> <sup>2</sup>	346.3	48.4	125	9.8	93	5
龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup>	96.3	13.5	775	60.9	1607	95
五峰组	38.2	5.3	134	10.5	0	0
宝塔组	207.2	28.8	53	4.2	0	0
合计	716.2	100	1272	100	1700	100

图7):自201HL-S井三开钻井周期最长,为118.26 d,自201HW-W井三开钻井周期最短,为49.48 d;与HL平台相比,HW平台三开平均钻井周期缩短了34.99 d,周期节约率为34.12%。

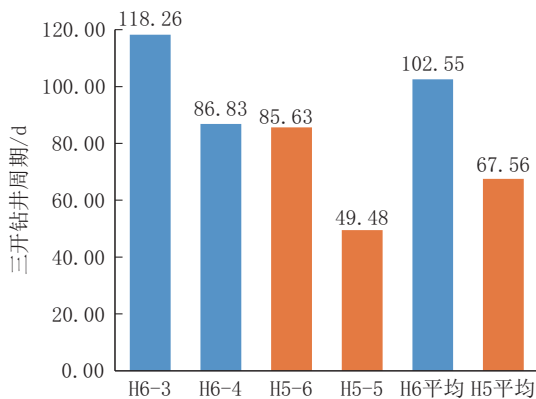


图7 自201井区完钻井三开钻井周期对比

Fig.7 Comparison of the drilling periods of Well Block Zi-201

#### 4 结论与建议

(1)自201区块龙马溪组地层构造差异大,破碎带及断层发育,井壁易失稳垮塌,加之微构造发育,井眼轨迹控制困难,优质储层钻遇率低,水平段安全钻进难度大,卡钻风险高。

(2)优选无扶螺杆钻具组合,调整了油基钻井液密度和性能,配合现场防卡操作,在自201井区HW平台现场应用2口井,三开钻井周期节约34.12%,优质储层钻遇率100%,实现了水平段正常完钻。

(3)建议继续开展高效清砂技术攻关,进一步改善环空流场分布,提高井眼清洁程度,有效降低阻卡

风险。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪海阁,王灵碧,纪国栋,等.国内外钻完井技术新进展[J].石油钻采工艺,2013,35(5):1-12.  
WANG Haige, WANG Lingbi, JI Guodong, et al. Advances in well drilling and completion technologies for domestic and overseas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(5): 1-12.
- [2] 聂靖霜,威远、长宁地区页岩气水平井钻井技术研究[D].成都:西南石油大学,2013:15-25.  
NIE Jingshuang. Research on shale gas horizontal well drilling technology in Weiyuan and Changning areas [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013:15-25.
- [3] 黄兵,万昕,王明华.富顺永川区块页岩气水平井优快钻井技术研究[J].钻采工艺,2015,38(2):14-16.  
HUANG Bing, WAN Xi, WANG Minghua. Research on optimized shale gas horizontal well drilling technologies in Fushun-Yongchuan block[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(2):14-16.
- [4] 刘伟,伍贤柱,韩烈祥,等.水平井钻井技术在四川长宁-威远页岩气井的应用[J].钻采工艺,2013,36(1):114-115.  
LIU Wei, WU Xianzhu, HAN Liexiang, et al. Application of horizontal well drilling technology in Changning-Weiyuan shale gas well, Sichuan province[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(1):114-115.
- [5] 王华平,张铎.威远构造页岩气钻井技术探讨[J].钻采工艺,2012,35(2):9-11.  
WANG Huaping, ZHANG Duo. Discussion on shale gas drilling technology in Weiyuan structure[J]. Drilling & Production Technology, 2012,35(2):9-11.
- [6] 白璟,刘伟,黄崇君.四川页岩气旋转向钻井技术应用[J].钻采工艺,2016,39(2):9-12.  
BAI Jing, LIU Wei, HUANG Chongjun. Application of rotary steerable drilling technology for shale gas in Sichuan[J]. Drilling

- &. Production Technology, 2016,39(2):9-12.
- [7] 张德军.页岩气水平井地质导向钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2015,38(4):7-10.  
ZHANG Dejun. Geo-steering drilling technology for shale gas horizontal wells and its application [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(4):7-10.
- [8] 郑军卫,孙德强,李晓燕,等.页岩气勘探开发技术进展[J].天然气地球科学,2011,22(3):511-516.  
ZHENG Junwei, SUN Deqiang, LI Xiaoyan, et al. Advances in exploration and exploitation technologies of shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3):511-516.
- [9] 李岩,郭军,王文彬.滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J].钻探工程,2021,48(8):12-18.  
LI Yan, GUO Jun, WANG Wenbin. Drilling difficulties and solutions for Well Yunxuandi-1 for shale gas survey in eastern Yunnan [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8):12-18.
- [10] 舒曼,赵明琨,许明标.涪陵页岩气田油基钻井液随钻堵漏技术[J].石油钻探技术,2017,45(3):21-26.  
SHU Man, ZHAO Mingkun, XU Mingbiao. Plugging while drilling technology using oil-based drilling fluid in fuling shale gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3):21-26.
- [11] 沈国兵,刘明国,晁文学,等.涪陵页岩气田三维水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻探技术,2016,44(2):10-15.  
SHEN Guobing, LIU Mingguo, CHAO Wenxue, et al. 3D trajectory control technology for horizontal wells in the fuling shale gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2):10-15.
- [12] Weedeen S. Unconventional completion technology revives old oil fields [J]. E & P, 2012, 85(2).
- [13] 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.
- [14] Langley D. Next steps for expandables [J]. World Oil, 2010, 231(7).
- [15] Glenda W, Ron H. Custom technology make shale resources profitable [J]. Oil & Gas Journal, 2007, 105(48):41-49.
- [16] 艾军,张金成,臧艳彬,等.涪陵页岩气田钻井关键技术[J].石油钻探技术,2014,42(5):9-15.  
AI Jun, ZHANG Jincheng, ZANG Yanbin, et al. The key drilling technologies in Fuling shale gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5):9-15.

(编辑 李艺)