

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024054

引用格式: 高航献, 李真祥, 胡彦峰. 元深 1 井超深井钻井提速关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 28-33.

GAO Hangxian, LI Zhenxiang, HU Yanfeng. Key drilling technologies for increasing ROP in ultra-deep well Yuanshen 1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 28-33.

元深 1 井超深井钻井提速关键技术

高航献¹, 李真祥¹, 胡彦峰²

(1. 中国石化勘探分公司, 四川成都 610041; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 元深 1 井是部署在川北低缓构造带上的重点探井, 钻井过程中面临地层压力体系复杂、井眼易坍塌、钻井液易漏失、陆相地层研磨性强、井控风险高等技术难题。根据地质特征, 借鉴邻井钻井经验, 应用泡沫钻井技术, 提高浅部地层大尺寸井眼机械钻速; 应用“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”和“旋冲钻具+混合式钻头”提速技术, 解决陆相高研磨性地层机械钻速低的难题; 应用耐高温防漏堵漏钻井液, 配套“高效 PDC 钻头+大扭矩螺杆”提速技术, 实现海相多压力体系复杂地层安全快速钻进; 用微心 PDC 钻头钻进目的层, 在满足岩屑录井需要的同时, 提高了钻井效率。该井顺利钻至井深 8 866.00 m 完钻, 创中国石化四川盆地直井井深最深纪录, 为四川盆地超深井钻井积累了经验。

关键词: 超深井; 深井钻井; 机械钻速; 元深 1 井; 元坝气田

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0028-06

Key Drilling Technologies for Increasing ROP in Ultra-Deep Well Yuanshen 1

GAO Hangxian¹, LI Zhenxiang¹, HU Yanfeng²

(1. Sinopec Exploration Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: Well Yuanshen 1 is a key exploration well located in the gentle structural belt of northern Sichuan. The drilling process encountered several technical challenges, including complex formation pressure systems, borehole collapse, drilling fluid loss, strong terrestrial formation abrasiveness, and high risk of well control, etc. Based on the geological characteristics and drilling experiences of adjacent wells, a series of drilling technologies were implemented to increase the rate of penetration (ROP). Foam drilling technology was utilized to improve the ROP in large boreholes within shallow formations. For the highly abrasive terrestrial formations, the technologies of “turbodrill+impregnated diamond bit” and “rotary percussion drilling rig+hybrid drilling bit” were employed to enhance ROP. The combination of high-temperature, leak-proof drilling fluid with “high-efficiency polycrystalline diamond compact (PDC) bit+high torque screw” technology enabled safe and rapid drilling in the complex formations of the marine multi-pressure system. The microcore PDC bit was used to drill into the target zone, enhancing drilling efficiency while meeting the needs of cuttings logging. The well was successfully drilled to a depth of 8 866.00 meters, setting a Sinopec's record for the deepest vertical well in the Sichuan Basin. This achievement provided technical experience for ultra-deep well drilling in the Sichuan Basin.

Key words: ultra-deep well; deep well drilling; rate of penetration; Well Yuanshen 1; Yuanba Gas Field

四川盆地深部油气资源丰富, 资源量超过 $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明率仅 6.8%, 是天然气勘探的重点领域^[1-7]。

元深 1 井是部署在川北低缓构造带上的一口重点风险探井, 主要目的是探明震旦系灯影组储层发育情

收稿日期: 2023-11-20; 改回日期: 2024-03-03。

作者简介: 高航献 (1972—), 男, 河南南阳人, 1996 年毕业于石油大学 (华东) 应用化学专业, 高级工程师, 主要从事石油钻井技术研究及管理工作。E-mail: gaohx.ktnf@sinopec.com。

通信作者: 胡彦峰, huyf.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化重大科技攻关项目“特深层油气钻完井关键技术与装备”之课题“四川盆地特深层钻完井技术配套与示范应用” (编号: P21081-7) 资助。

况及含气性,设计井深 8 680.00 m。该井储层埋藏超深,井底温度高达 190 ℃,地层压力接近 150 MPa。根据该地区已钻井的钻进情况,该井钻井作业面临着系列技术难题:地层压力体系复杂,易坍塌、易漏失地层难以完全封隔^[8];陆相难钻地层研磨性强、可钻性差,大尺寸井眼提速困难;钻遇气层多,井控风险高,钻井提速技术优选难度大等^[9-11]。为此,在详细分析钻遇地层地质特征的基础上,借鉴邻井钻井经验,通过研选高效 PDC 钻头、应用系列钻井提速技术和随钻防漏堵漏技术,有效解决了钻井过程中遇到的技术难题,实现了安全快速钻井,顺利钻至井深 8 866.00 m 完钻,圆满完成了该井的钻探任务,并创中国石化四川盆地直井井深最深纪录。

1 地层岩性特点与钻井技术难点

1.1 地层岩性特点

元深 1 井自上而下依次钻遇白垩系剑门关组,侏罗系蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组、千佛崖组 and 自流井组,三叠系须家河组、雷口坡组、嘉陵江组和飞仙关组,二叠系长兴组、吴家坪组、茅口组、栖霞组和梁山组,志留系小河坝组和龙马溪组,奥陶系五峰组、宝塔组和湄潭组,寒武系洗象池群组、陡坡寺组、龙王庙组、沧浪铺组、仙女洞组和筇竹寺组,目的层为震旦系灯影组。

元深 1 井陆相地层均为高压-异常高压地层,地层压力系数为 1.23~1.94,其中须家河组地层压力系数最高(达到 1.94),地层破裂压力梯度较高(2.47~3.21 MPa/100m)。自流井组下部、须家河组砂岩中石英含量高,其中须家河组砂岩中的石英平均含量达 75% 以上^[12]。

元深 1 井海相地层中,长兴组礁滩相储层及灯影组丘滩相储层均为常压地层,其他地层基本为高压-异常高压地层。其中,茅口组地层压力最高,压力系数达 2.05;长兴组及灯影组破裂压力梯度明显低于其他地层,小于 2 MPa/100m;其他地层破裂压力梯度均大于 2 MPa/100m。嘉陵江组地层发育高压卤水层,元坝 27 井和元坝 6 井分别采用密度 1.47 和 1.50 kg/L 的钻井液钻进该地层时发生溢流。洗象池群组至沧浪铺组地层主要为泥岩和白云岩,岩石强度整体较高,研磨性较强。储层灯影组地层岩性主要为白云岩,富含硅质条带,地层软硬交错,可钻性差^[13]。

1.2 钻井技术难点

元深 1 井设计为五开制直井,井身结构设计见图 1。该井一开封隔上部承压能力低的地层,二开封隔须家河组气层及海陆相过渡带破碎地层,三开封隔长兴组及以上地层,四开封隔灯影组以上地层,为安全钻进目的层创造条件,五开钻进震旦系灯影组 200.00 m 完钻。

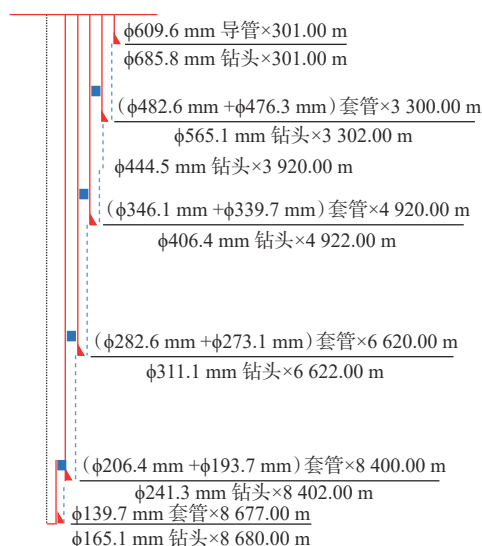


图 1 元深 1 井设计井身结构

Fig.1 Designed casing program of Well Yuanshen 1

元深 1 井主要存在以下钻井技术难题:

1) 大尺寸井眼空气泡沫钻井难度大。上部地层易出水,应用泡沫钻井技术钻进大尺寸井眼时,井壁稳定和携砂困难,发生卡钻的风险大。例如,元坝 6 井应用气体钻井技术钻至井深 46.70 m 时地层出水,导致钻头泥包严重。

2) 部分地层研磨性强,可钻性差。陆相地层、海相深部地层岩石硬度高,研磨性强,可钻性差。下沙溪庙组、自流井组、须家河组和吴家坪组等地层软硬交错,夹层多,钻进时跳钻严重,钻速慢。须家河组地层以研磨性强的石英质砂岩为主,单轴抗压强度 100~332 MPa,导致钻头寿命较低,常规钻井方式机械钻速低。例如,元坝 27 井下沙溪庙组—雷口坡组地层,主要采用“牙轮/PDC 钻头+常规钻井技术”钻进,平均机械钻速仅 0.81 m/h;特别是须家河组,机械钻速仅为 0.46~0.55 m/h。

3) 钻井提速工具应用受限。该井纵向上存在多套压力体系,高低压互层,且裂缝、断层发育,可能出现井漏、喷漏同存等问题,提速工具应用受限,且为满足井控要求,钻井液密度普遍超过设计钻井液密度上限,高密度钻井液的压持效应导致钻速

慢。例如,川深1井二开2 849.92~4 264.00 m井段设计钻井液密度1.20~1.70 kg/L,实际钻井液密度达2.05 kg/L,平均机械钻速1.00 m/h,纯钻时间1 403.00 h,超出设计纯钻时间(871.87 h)达531.13 h。

4) 钻具安全风险高。该井深部地层高含硫化氢,需要采用防硫钻具钻进,但其抗拉强度低,抗拉安全系数低,钻井过程中易出现断钻具故障。根据地质预测结果,该井可能钻遇长兴组的元坝地区2#生物礁边缘,地层压力系数低,易发生恶性漏失,需要定向钻进以避免生物礁;且钻具组合在定向段的起钻摩阻大,进一步增大了钻具载荷,增加了钻具断裂风险。

2 钻井提速关键技术

2.1 泡沫钻井技术

元坝区块陆相上沙溪庙组及以浅地层钻井过程中易出水,井壁失稳和井漏频发,大尺寸井眼钻速慢,应用泡沫钻井技术取得了较好的提速效果^[14]。为此,元深1井一开0~2 000.00 m井段设计采用泡沫钻井技术,针对大尺寸井眼泡沫钻井存在的携砂困难问题,选用 $\phi 139.7$ mm大水眼钻杆,并提高气体排量,以满足携砂和安全钻井需要。针对泡沫钻井钻具振动大的问题,优化了钻具组合,加入双向减振器,同时加强钻具探伤和钻具倒换。该井泡沫钻井钻具组合为: $\phi 565.1$ mm KHD515GC型牙轮钻头+浮阀+ $\phi 279.4$ mm液力双向减振器+ $\phi 279.4$ mm钻铤 $\times 6$ 根+ $\phi 228.6$ mm钻铤 $\times 6$ 根+ $\phi 203.2$ mm无磁钻铤 $\times 1$ 根+ $\phi 203.2$ mm钻铤 $\times 2$ 根+ $\phi 203.2$ mm随钻震击器+ $\phi 203.2$ mm钻铤 $\times 3$ 根+旁通阀+ $\phi 139.7$ mm钻杆。设计泡沫钻井参数为:钻压100~250 kN,转速50~70 r/min,气体排量260~310 m³/min,泡沫基液流量8~15 L/s。考虑携岩需求及井下安全,井深2 000.00 m以深地层采用钻井液钻进。

2.2 高效PDC钻头

陆相地层自流井组珍珠冲段、须家河组地层压实程度高,普遍含砾石及石英颗粒,研磨性极强。元坝区块须家河组地层使用常规PDC钻头钻进时,钻头工作不平稳,复合片抗冲击能力不足,出现钻头崩齿,鼻部、肩部碳化钨基底磨损严重等问题,导致钻头先期损坏失效^[15-17]。为此,研制了AX616型高效PDC钻头(见图2):采用六刀翼和深内锥结构,提高钻头工作的稳定性;采用双排齿设计,选用

高耐磨性进口复合片及特殊复合材料后排背齿,限制切削齿吃入地层深度,降低崩齿概率,提高钻头抗冲击性和抗研磨性。这样可有效解决钻头在硬地层工作时的粘滑现象,保证平稳工作,同时减小钻头的横向滑动,保证切削效率,延长钻头使用寿命。



图2 AX616型PDC钻头冠部结构

Fig.2 AX616 PDC bit crown structure

AX616型PDC钻头在元深1井4 289.00~4 293.00 m井段(须三段地层)进行了应用,钻进4.00 m后由于发生井漏,被迫起钻下入常规钻具组合堵漏。但该钻头在川南泸州区块阳101平台阳101H6-5井1 077.00~1 515.00 m井段(须家河组地层)进行了应用,一趟钻进尺438.00 m,纯钻54 h,平均机械钻速8.47 m/h,较同平台邻井机械钻速(6.46 m/h)提高31%。

2.3 硬地层钻井提速技术

2.3.1 “涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”提速技术

涡轮钻具采用全金属构件,耐温和抗冲蚀性能良好,转速800~2 000 r/min,能实现钻头高速旋转并提高钻速。孕镶钻头由天然金刚石、硬质合金和孕镶材料高温堆焊集结,利用孕镶齿中金刚石的自磨自锐性能在高转速下破碎地层。“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”提速技术能够显著增加钻头转速及钻压,增强井下钻具的稳定性,延长单只钻头使用寿命,可提高可钻性差、研磨性强、砾石层及石英含量高极难钻地层的机械钻速。该提速技术在元坝区块多口井千佛崖—须家河组陆相地层钻井进行了应用,取得了明显的提速效果^[18]。其中,元陆H-1井四开 $\phi 215.9$ mm井段单只钻头最高进尺1 292.00 m,平均机械钻速2.69 m/h;龙岗X1井三开 $\phi 215.9$ mm井段单只钻头进尺392.00 m,纯钻时间143.6 h,平均机械钻速2.73 m/h。

2.3.2 “旋冲钻具+混合式钻头”提速技术

混合式钻头融合了牙轮钻头冲击压碎和PDC钻头刮削破岩的特点,钻进硬地层过程中,通过牙

轮的冲击压碎作用降低岩石强度,从而降低硬地层岩石对 PDC 切削齿的冲击损坏,在提高破岩效率的同时保护钻头,延长钻头使用寿命。川深 1 井 3 279.54~3 522.21 m 井段(自流井组珍珠冲段—须家河组五段)应用混合式钻头钻进,纯钻时间 277 h,平均机械钻速 1.42 m/h。旋冲钻井技术是在钻具组合中安装一个能产生高频冲击作用的冲击器,使钻头承受周期性的(冲击频率 6~20 Hz)冲击动载,从而提高硬地层破岩效率^[19]。元深 1 井珍珠冲组—须一段地层应用“旋冲钻具+混合式钻头”钻进,6 趟钻进尺 313.00 m,平均机械钻速 1.07 m/h,提速效果显著,但单趟进尺较短,平均仅为 52.00 m。

2.3.3 微心 PDC 钻头

PDC 钻头形成的岩屑细碎,无法满足岩屑录井的要求,因而探井目的层往往应用牙轮钻头钻进,以准确判断层位和岩性。但相对于 PDC 钻头,牙轮钻头的进尺少、机械钻速低,起下钻次数多,导致超深目的层钻井周期长,钻井成本高。微心钻头兼具 PDC 钻头和牙轮钻头的优点^[20],通过改进 PDC 钻头的结构,使其在保留机械钻速快、使用寿命长和钻进安全等优点的同时,能够获得较大的岩屑,满足岩屑录井的需要。因此,元深 1 井目的层灯影组设计选用微心 PDC 钻头钻进。

2.4 高温超深层井筒强化技术

为解决海相深部高温地层压力系数差别大、漏失风险大和低压地层压差卡钻风险大的难题,根据随钻封堵和渐进式承压堵漏的思路,开展了高温超深层井筒强化技术研究。优选抗温性好的云母、矿物纤维等矿物类堵漏材料,并采用刚性粒子、弹性粒子、变形粒子和沥青类等多粒径复配,达到大颗粒架桥、中细颗粒逐级封堵的效果,弹性粒子确保裂缝开启后也能形成致密封堵层^[21-22]。随钻渐进式承压方法能确保在钻开低压渗透性地层时,快速形成薄而致密的滤饼,提高井筒承压能力的同时降低压差卡钻概率。随钻防漏钻井液配方为:井浆+3%~5% 高效随钻封堵剂 SMGF-1+1%~3% 裂缝复合堵漏剂 SMLF-1+3%~5% 超细碳酸钙 QS-2。

3 钻井提速效果分析

元深 1 井通过应用超深井钻井提速关键技术,有效减少了井下故障,提高了机械钻速,顺利钻至井深 8 866.00 m 完钻,全井平均机械钻速 2.16 m/h。

3.1 泡沫钻井提速效果

φ685.8 mm 导管井段应用泡沫钻井技术一趟钻

完成,进尺 300.00 m,纯钻时间 66.0 h,平均机械钻速 4.55 m/h。一开 300.00~2 000.00 m 井段应用泡沫钻井技术 4 趟钻完成,进尺 1 695.00 m,纯钻时间 265.5 h,平均机械钻速 6.38 m/h,与该地区常规钻井(采用钻井液)相比,机械钻速提高 80.7%。元深 1 井导管和一开井段泡沫钻井提速效果见表 1。

表 1 元深 1 井泡沫钻井提速效果统计结果
Table 1 Statistics of foam drilling effect for increasing ROP in Well Yuanshen 1

钻井方式	钻进井段/m	进尺/m	纯钻时间/h	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)
泡沫钻井	0~300.00	300.00	66.0	4.55
	300.00~1 176.00	871.00	122.0	7.14
	1 176.00~1 435.00	259.00	37.0	7.00
	1 435.00~1 836.00	401.00	87.0	4.61
常规钻井	1 836.00~2 000.00	164.00	19.5	8.41
	2 000.00~2 307.00	307.00	87.0	3.53

3.2 二开陆相硬地层提速效果

二开 3 920.00~4 760.00 m 井段为自流井—须家河组高研磨性地层,在强化井筒稳定性的基础上,采用“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”、“旋冲钻具+混合式钻头”和“高效 PDC 钻头+射流冲击器”钻井提速技术 13 趟钻完成,进尺 840.00 m,平均机械钻速 1.06 m/h。与邻井相同井段硬地层平均机械钻速相比,提高了 29.3%(见图 3)。其中,“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”共入井 5 趟,累计进尺 518.00 m,平均机械钻速 1.08 m/h。由于孕镶金刚石钻头的钻进时间长,减少了起下钻次数,缩短了钻井周期,“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”钻井提速技术可作为元坝区块自流井组珍珠冲段—须家河组含砾强研磨性砂岩地层钻井提速的有效手段。

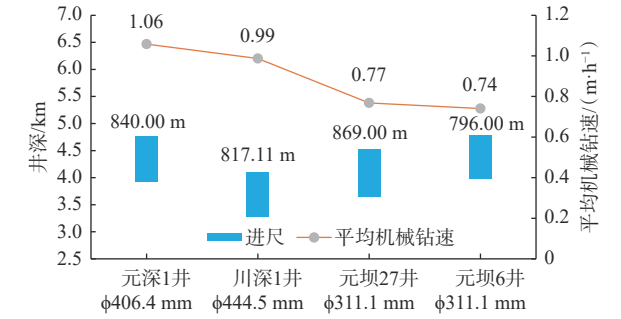


图 3 元深 1 井与邻井的陆相硬地层机械钻速对比
Fig.3 Comparison of ROP in hard terrestrial formation of Well Yuanshen 1 and adjacent wells

3.3 三开井段

三开 4 740.00~6 800.00 m 井段共计 14 趟钻完

成(取心1趟),进尺2 060.00 m,钻井时间127.0 d,平均机械钻速2.61 m/h。钻进吴家坪组地层时钻井液漏失5次,钻进嘉五段和嘉四段时钻井液漏失1次,累计漏失钻井液1 036.60 m³,损失钻井时间17.03 d。

雷口坡组—长兴组上部4 780.00~6 378.00 m井段采取定向钻进,最大井眼曲率2.68°/30m(井深4 950.00 m处),最大井斜角10.72°(井深4 850.00 m处),成功避开长兴组生物礁边缘,避免了钻遇低压易漏地层。因堵漏时应用牙轮钻头钻进,实际定向进尺1 594.00 m,定向井段平均机械钻速2.74 m/h。

3.4 四开井段

四开6 800.00~8 140.00 m井段吴家坪组—筇竹寺组地层17趟钻(取心1趟)完成,进尺1 340.00 m,平均机械钻速1.49 m/h。四开既钻遇吴家坪组、茅口组等高压地层,也钻遇志留系、寒武系下统等低压地层。为此,优化了钻井液的封堵性能,采取随钻防漏措施,在地层压力系数相差0.30~0.80的情况下,应用密度2.15~2.25 kg/L钻井液钻进,未发生钻井液漏失和井壁失稳情况。

栖霞组—龙王庙组为高强度脆性灰岩、泥页岩和白云岩地层,进行了“高效PDC钻头+大扭矩螺杆”钻井提速试验,试验井段7 256.00~7 783.50 m,一趟钻完成,平均机械钻速2.99 m/h,与川深1井相同井段相比,节约了1趟钻,缩短了钻井周期。

3.5 五开井段

五开8 604.00~8 866.00 m井段为目的层灯影组,综合考虑岩屑录井、钻具安全和钻井提速的需求,优选了百施特T135J1DRT微心PDC钻头,应用了防硫钻杆组合:φ152.4 mm(钢级G105,全新)钻杆+φ127.0 mm(钢级G105)钻杆+φ101.6 mm(钢级G105)钻杆,并优化各规格钻杆组合的长度,确保钻杆组合的抗拉余量超过450 kN。灯影组平均机械钻速1.54 m/h,与邻井仁探1井(应用牙轮钻头钻进,平均机械钻速0.98 m/h)相比,平均机械钻速提高57%,大幅缩短了起下钻时间,提速效果显著。

4 结论与建议

1)元深1井通过应用泡沫钻井技术,“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”、“旋冲钻具+混合式钻头”及“高效PDC钻头+大扭矩螺杆”提速技术,高温超深层井筒强化技术等一系列超深井钻井提速技术,顺利钻至井深8 866.00 m,实现了安全快速钻

井,为四川盆地超深井钻井积累了经验。

2)针对川北地区浅部地层破碎、溶洞发育、易出水的特点,采用泡沫钻井技术,可大幅提高机械钻速,建议开展应用工程机/小型钻机空气钻方式钻进浅表层的可行性研究。

3)“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”和“旋冲钻具+混合式钻头”提速技术,可以有效提高陆相坚硬难钻地层的机械钻速,同时保障井身质量。

4)高温超深层井筒强化技术能够满足海相长裸眼段低承压地层井筒强化需求,有效解决海相深部高温地层压力系数差别大、漏失风险大和低压地层压差卡钻风险大的难题。

参考文献

References

- [1] 李辉,朱祥,李毕松,等.四川盆地北部震旦系天然气勘探潜力分析[J].特种油气藏,2018,25(1):52-57.
LI Hui, ZHU Xiang, LI Bisong, et al. Sinian natural gas exploration potential analysis in the northern Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 52-57.
- [2] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等.中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J].中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
HE Zhiliang, JIN Xiaohui, WO Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 3-14.
- [3] 贾利春,李枝林,张继川,等.川南海相深层页岩气水平井钻井关键技术与实践[J].石油钻采工艺,2022,44(2):145-152.
JIA Lichun, LI Zhilin, ZHANG Jichuan, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 145-152.
- [4] 王明筏,文虎,倪楷,等.四川盆地北部大隆组页岩气地质条件及勘探潜力[J].西南石油大学学报(自然科学版),2023,45(1):13-23.
WANG Mingfa, WEN Hu, NI Kai, et al. Geological conditions and exploration potential of shale gas in Dalong Formation in Northern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 13-23.
- [5] 尚墨翰,赵向原,胡向阳,等.川东北元坝地区陆相储层天然裂缝发育特征及分布模式[J].断块油气田,2022,29(1):8-13.
SHANG Mohan, ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, et al. Development characteristics and distribution patterns of natural fractures of continental reservoir in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(1): 8-13.
- [6] 陶夏妍,黄天俊,张艺华,等.四川盆地东北部三叠系飞仙关组迁移型鲕滩层序地层分析及相控储层预测[J].特种油气藏,2023,30(6):62-71.
TAO Xiayan, HUANG Tianjun, ZHANG Yihua, et al. Sequence stratigraphical analysis and facies-controlled reservoir prediction of

- migratory oolitic beach in Triassic Feixianguan Formation, north-eastern Sichuan Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(6): 62–71.
- [7] 舒逸, 郑有恒, 包汉勇, 等. 四川盆地复兴地区下侏罗统页岩油气富集高产主控因素[J]. 世界石油工业, 2023, 30(5): 26–38.
- SHU Yi, ZHENG Y H, BAO H Y, et al. Main controlling factors for high yield and enrichment of shale oil and gas in the Lower Jurassic in the Fuxing Area of Sichuan Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(5): 26–38.
- [8] 葛鹏飞, 马庆涛, 张栋. 元坝地区超深井井身结构优化及应用[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(4): 83–86.
- GE Pengfei, MA Qingtao, ZHANG Dong. Optimization and application of ultra-deep well casing program in Yuanba Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(4): 83–86.
- [9] 张金成, 张东清, 张新军. 元坝地区超深井钻井提速难点与技术对策[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(6): 6–10.
- ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing, ZHANG Xinjun. Difficulties of improving rate of penetration and its technical solutions in Yuanba Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(6): 6–10.
- [10] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 82–94.
- DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12): 82–94.
- [11] 李涛, 苏强, 杨哲, 等. 川西地区超深井钻井完井技术现状与攻关方向[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 7–15.
- LI Tao, SU Qiang, YANG Zhe, et al. Current practices and research directions for drilling and completion technologies for ultra-deep wells in western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 7–15.
- [12] 叶金龙, 沈建文, 吴玉君, 等. 川深 1 井超深井钻井提速关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 121–126.
- YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep Well Chuan-shen-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 121–126.
- [13] 贾俊, 康海涛, 刘洪彬, 等. MS1 井超深海相地层取心实践与认识[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(1): 142–146.
- JIA Jun, KANG Haitao, LIU Hongbin, et al. Practice and recognitions of coring in the super deep marine strata of Well MS-1[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(1): 142–146.
- [14] 曹品鲁, 马文英, 张兆国, 等. 可循环空气泡沫钻井技术在元坝 10 井的应用[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(5): 49–52.
- CAO Pinlu, MA Wenying, ZHANG Zhaoguo, et al. Application of recycling air-foam drilling technology in Well Yuanba-10[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(5): 49–52.
- [15] 彭齐, 周英操, 周波, 等. 凸脊型非平面齿 PDC 钻头的研制与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 49–55.
- PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 49–55.
- [16] 王滨, 李军, 邹德永, 等. 适合强研磨性硬地层 PDC-金刚石孕镶块混合钻头设计与应用[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(1): 169–174.
- WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Design and application of a PDC hybrid drill bit with impregnated diamond insert for the hard formation with strong abrasivity[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(1): 169–174.
- [17] 高德利, 刘维, 万绪新, 等. PDC 钻头钻井提速关键影响因素研究[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 20–34.
- GAO Deli, LIU Wei, WAN Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 20–34.
- [18] 解兰宏, 张金成, 张东清, 等. 涡轮钻井技术在元坝等重点区块的应用[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(6): 15–18.
- XIE Lanhong, ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing, et al. The application of turbo drilling technology in Yuanba key area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(6): 15–18.
- [19] 王甲昌, 滕春鸣, 张海平, 等. 机械式旋转冲击钻井工具研制及试验[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(6): 68–71.
- WANG Jiachang, TENG Chunming, ZHANG Haiping, et al. Development and experiment of rotary percussion positive displacement motor[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(6): 68–71.
- [20] 田京燕, 徐玉超. 微心 PDC 钻头设计及现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(1): 65–68.
- TIAN Jingyan, XU Yuchao. Design and field application of a micro-coring PDC bit[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(1): 65–68.
- [21] 王涛, 刘锋报, 罗威, 等. 塔里木油田防漏堵漏技术进展与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(1): 28–33.
- WANG Tao, LIU Fengbao, LUO Wei, et al. The technical advance and development suggestions for leakage prevention and plugging technologies in the Tarim Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 28–33.
- [22] 刘书杰, 刘和兴, 王成文, 等. 超深水裂缝储层自降解随钻堵漏剂性能研究[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(2): 107–115.
- LIU Shujie, LIU Hexing, WANG Chengwen, et al. Study on properties of self-degrading lost circulation agent while drilling in ultra-deepwater fractured reservoir[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(2): 107–115.

[编辑 陈会年]