

利用地层测试技术验证阿北凹陷综合地质认识

张宇飞,王攀,淡伟宁,田然,王成云,孙瑞娜

中国石油华北油田分公司勘探开发研究院 河北任丘 062552

通讯作者:Email:wty_wpan@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司重大科技项目“华北油田持续有效稳产勘探开发关键技术研究与应用”(2017E-15)

引用:张宇飞,王攀,淡伟宁,等. 利用地层测试技术验证阿北凹陷综合地质认识[J]. 油气井测试,2021,30(3):58-63.

Cite: ZHANG Yufei, WANG Pan, DAN Weining, et al. Verification of comprehensive geological knowledge of Abei sag by formation testing technology [J]. Well Testing, 2021,30(3):58-63.

摘要 阿北凹陷构造活动剧烈,地层破碎,地震资料品质较差,且存在稠油油藏,成藏规律不清。为理清该区油气富集规律,开展精细构造解释、沉积储层研究和成藏条件分析,明确凹陷地质特征,确定稠油油藏为腾一段生油次注供烃的原生稠油,分布范围较小。在该区设计钻探了一批井位,在第一口井X16井完钻后,应用MFE射孔联作+WDT无线传输地层测试技术,采用二开二关抽汲工作制度,进行液性及产能分析和储层综合评价,落实了阿北凹陷原油相对密度(20℃)0.876 9 g/cm³,黏度(50℃)39.03 mPa·s,为低硫高含蜡多胶质原油。该井原油物性较好,测试结论为油层,之后对该井进行常规试油,获高产工业油流。地层测试技术的应用验证了地质认识的真实性,为阿北凹陷勘探部署提供了依据。

关键词 阿北凹陷; DST测试; 常规试油; 稠油油藏; 成藏机理; 评价解释; 产能分析

中图分类号:TE312 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.010

Verification of comprehensive geological knowledge of Abei sag by formation testing technology

ZHANG Yufei, WANG Pan, DAN Weining, TIAN Ran, WANG Chengyun, SUN Ruina

Exploration and Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: Abei depression is developed with strong tectonic activities, fragmented stratigraphy, poor quality seismic data, unclear reservoir-forming rule and thick oil reservoirs. In order to clarify the law of oil and gas enrichment in the research area, this research carry out fine tectonic interpretation, sedimentary reservoir study and reservoir formation conditions analysis. The petroleum geological characteristics of the depression is clarified, as well as the small ranged original heavy oil, which is supplied by the oil-generating sags in the upper part of first section of Tengge'er formation. A number of wells were designed and drilled in the research area. After the completion of the first well X16, the formation testing technology, combining MFE-perforation combination operation with WDT wireless transmission test technology, was applied in time to conduct fluid and capacity analysis, as well as the comprehensive evaluation of the reservoir. The relative density of crude oil (20℃) is 0.876 9 g/cm³, and the viscosity (50℃) is 39.03 mPa·s. The crude oil was analyzed as low-sulfur, high-wax and multi-gelatinous. The physical properties of crude oil in this well were good and the test was concluded to be an oil formation, followed by a conventional oil test to obtain a high-yield industrial oil stream. It confirms that formation testing technique is an effective means to verify geological understandings.

Keywords: Abei depression; DST test; conventional oil production test; heavy oil reservoir; enrichment principle; evaluation; productivity analysis

阿北凹陷位于马尼特坳陷东部,南与二连油田主要产油区阿南凹陷相邻,面积约600 km²。发育有欣苏木、扎拉格、阿东以及阿西四个正向构造。已发现油藏为构造油藏,分布在欣苏木、扎拉格构造带^[1-2]。前人在该区按照构造油藏的模式落实了一批目标,但凹陷稠油油藏形成原因一直未明确,阿北凹陷勘探工作近十年来一直处于停滞状

态^[3-6]。分析该区勘探失利原因,认为构造难于落实和成熟烃源岩分布规律不清是制约勘探的主要因素。

本次研究首先运用新连片地震数据进行精细构造落实,明确了凹陷构造特征。开展沉积研究,明确该区腾一段发育大型扇三角洲砂体,物性普遍较好。最后进行成藏研究,认为凹陷油气具有“正

向构造聚油,反向断块富集”的成藏规律,开展油源分析,确定凹陷稠油为原生稠油,烃源岩来自腾一上段低成熟烃源岩,且该腾一上段生油次洼分布范围较小,凹陷其他正向构造不受其影响,均具备较好的油源条件,设计部署了一批井位。为了验证综合地质研究结果,本次研究在该区第一口井X16井完钻后,及时应用地层测试技术,进行液性及产能分析和储层综合评价。

地层测试技术是快速认识和评价储层、查清地层产液性质和油气水产能的有效手段,在国内外油气田勘探开发中得到了广泛应用,该技术为油气田勘探提供了基础资料。张以明等^[7]利用中途裸眼坐封螺杆泵联作技术加快巴彦河套盆地吉兰泰凹陷新区太古界储层勘探发现。刘述忍等^[8]、张士川等^[9]利用负压测试阀射孔联作技术和天然气密闭燃烧装置,录取了杨税务潜山气藏测试层资料,解决了天然气放喷计量过程中的环境污染问题,为深化地质人员对杨税务潜山储层的认识和评价提供了技术支持。雷鹏等^[10]采用裸眼选层锚测试工艺提高了裸眼中途测试成功率。王鑫鑫等^[11]收集了近百口低渗透砂岩储层压裂措施井压前地层测试资料,采用统计分析技术,提出了针对此类储层的压裂选层方法。温杰文^[12]介绍的超深小井眼地层测试工艺技术,能够保障127.0 mm及114.3 mm小井眼井试油测试作业顺利完成,为深部气藏的勘探开发提供了技术支撑。邢晓光等^[13]结合南堡油田测试井温度、压力、井斜以及地层产能的实际情况,形成一套冀东油田不同井况条件下的测试工艺技术系列,推动了冀东油田的勘探开发进度。目前,陆地试油常规测试无法对井底数据进行实时监测,通常需要起出管柱工具仪器才能得到测试数据,这种工艺主要存在两个弊端:一是在试油测试环节(如射孔、开关井)出现问题时不能技术监测,导致后期测试周期延误;二是测试最终目的是获取储层压力、渗透率等各项物性参数,如果开关井时间不合理,会导致测试资料录取不到合理有效参数而导致重复性测试。因此,本次研究中,X16井完钻后,应用井下无线传输测试技术,保障了测试成功率和试油成效,最终落实了该井原油物性较好,测试结论为油层,验证了以上地质认识的真实性和阿北凹陷勘探部署提供了及时的依据。

1 综合地质研究

开展以下几方面的综合地质研究,明确了构造

演化特征,并指导沉积储层研究,最终确定凹陷油气具有“正向构造聚油,反向断块富集”的富集规律。

1.1 断裂构造特征

基于新资料开展构造解释认为,阿北-京特乌拉地区断裂极为发育,主要发育两期断裂,其中早期长期发育的顺向南掉伸展断层,被晚期构造挤压走滑期的走滑断层复杂化。

研究认为,阿北-京特乌拉地区主要发育两期应力场,即断拗期拉张伸展应力场、回返期挤压剪切走滑应力场,两种应力场先后叠加是该区断裂发育的主要控制因素。

在北部陡带,陡带西侧以背斜背景下的断阶为主要样式,断阶被挤压改造形成反向断块与顺向断块,分布在塌陷背斜的南北两翼。陡带中部欣苏木构造带及其两翼地区,发育X型组合的断层,主要为早期南掉断层被晚期北掉走滑断层切割所致,表现为明显的扭动构造样式。其应力作用特征是:顺向断阶受挤压形成断背斜,先存断层断面弯曲;走滑沿先存大断层断面发生,表现为塌陷调节断层样式;走滑强度大处,可错开先存断面;塌陷走滑带的南北两翼继承性发育“背洼”与“面洼”两类反向构造。陡带东部的阿东构造带,背斜特征较西部弱,主要样式表现为发育多条晚期北掉走滑断层,与边界断层组合形成羽状、花状构造样式。

1.2 沉积体系与储层特征

现今地形图显示,阿北凹陷西部发育一个大型系列汇水区,该凹陷为继承性凹陷,故推测阿北凹陷主要发育西部物源砂体。针对主要目的层腾一段Ⅱ砂组进行重矿物分析,进一步明确该区西部物源又可细分为西-东向和西北-东南向两个方向。A52井ZTR值高于A55井;AC1井ZTR值高于A62井(图1中箭头),说明物源方向为西-东向和西北-东南向两个方向。A52井、A55井GZi值明显高于AC1井,也表明两个井区来自变质岩物源供给规模有所差异,为不同物源。

单井相分析,认为该区腾一段发育扇三角洲沉积,砂体主要为扇三角洲前缘水下分流河道砂体。该区砂体搬运距离远,储层物性普遍较好。统计该区砂体物性可知,Ⅱ砂组孔隙度6%~22%,渗透率0.01~500.00 mD,发育有中孔中渗储层。

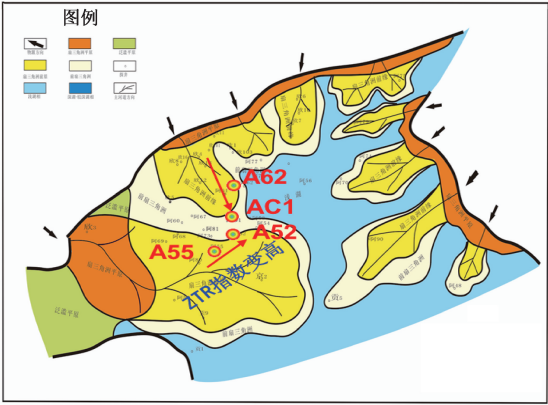


图 1 阿北凹陷腾一段 II 砂组沉积相分析图
Fig. 1 Sedimentary facies analysis of II sand group of upper Teng section in Abei depression

1.3 成藏特征

阿北凹陷有稠油和稀油两种原油,仅 A60 井区为稠油油藏,密度:0.94~0.96 g/cm³,黏度 215~1 316 mPa·s,凝固点 15~34 ℃。该井区较欣苏木和扎拉格构造更靠近东部洼槽区,油稠原因不明,为此开展油源分析。

凹陷主要烃源岩来自腾一段,有机质丰度高,为中等-好丰度烃源岩,从 AC1 井烃源岩地化分析可知,AC1 井腾二段有机质类型为 II₁-III 型,腾一上段为 I-II₂ 型,腾一下段为 II₁-II₂ 型,AC1 井腾二段处于未成熟阶段,腾一上段处于低熟阶段,腾一下段处于成熟阶段。综合多口井热演化分析认为,阿北凹陷正常演化曲线生烃门限 1 400 m。分层系统计多口井热演化分析结果认为(图 2),该区腾一上段烃源岩处于低成熟阶段,腾一下段为成熟阶段。

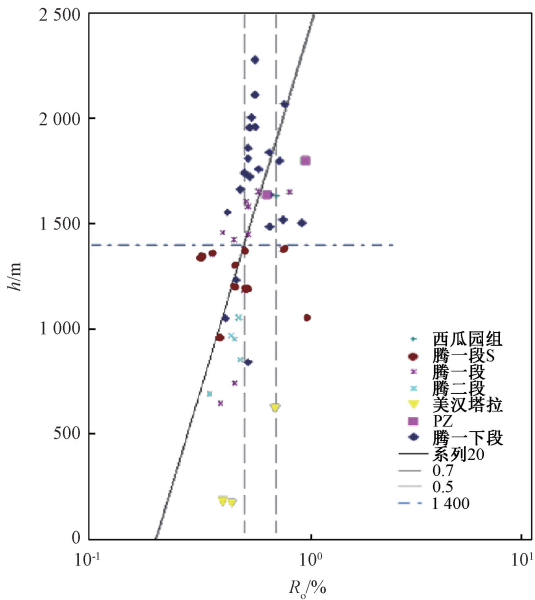


图 2 阿北凹陷各地层 R_o 深度演化趋势图
Fig. 2 R_o depth development trend of each layer in Abei depression

A66 井稠油油藏水型为 NaHCO₃,总矿化度一般为 3 800 mg/L,属弱还原环境水型,且稠油的 ββ/ΣC29 为 0.196 1~0.241 0,20S/20(S+R) C29 为 0.146 3~0.349 2,具有低熟油特点。分析认为,原油没有经过明显的生物降解、水洗和氧化等稠化作用,油藏后期破坏作用不明显,油质稠的原因并非后期作用,而是由于源岩成熟度较低,母质类型较好,产生的烃类原本较稠,原油又产自烃原岩附近,没有经过长距离运移,形成原生的稠质油。

地震剖面显示,A60 井区以西发育一个较小的腾一上段生油次洼,通过断层直接与 A60 圈闭对接,分析认为 A60 圈闭定型早,接收来自 A60 西部腾一上段低熟原油的充注(图 3 蓝色圈处);晚期构造挤压改造时,阿 60 区块远离欣苏木构造带,构造改造弱,导致白垩末来自阿北凹陷烃源岩的成熟油未能驱替腾一上段的低熟油(圈闭中低熟油保存至今),导致 A60 井区油质重(密度大于 0.94)、胶质沥青质高(低熟)。通过精细构造落实,明确该腾一上段生油次洼分布范围较小,故认为该区其他正向构造油气的充注并未受其影响,具备较好的油源条件。

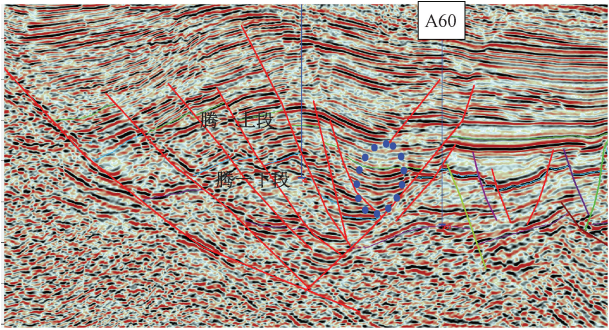


图 3 过 A60 井地震剖面
Fig. 3 Seismic profiles across Well A60

已钻井揭示该区油气主要环腾一下段生油洼槽环状分布,此外阿北凹陷断层发育,地层破碎,构造条件十分复杂,区域有顺向和反向两种正断层发育,均影响圈闭的形成。凹陷腾格尔组为典型下粗上细、正旋回韵律岩性组合,腾一段顶部、腾二段发育大套泥岩,腾一段 II 砂组为主要油层,通过反向断层容易与泥岩盖层对接,故反向正断层的侧向封堵性较好,是区有利的成藏圈闭类型,顺向断块圈闭成藏效果较差。构建“近源正向构造聚油-反向高块富集”成藏模式(图 4),设计了多口井位,目前 X16 井完钻。

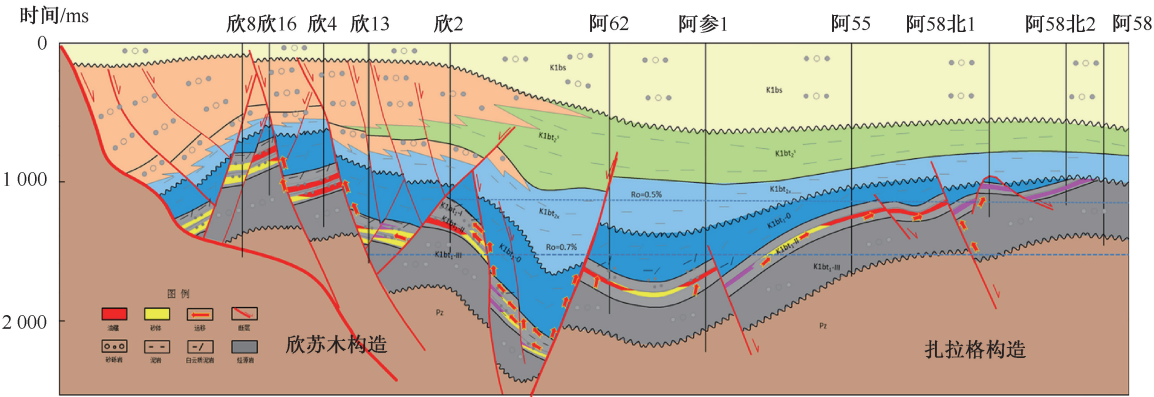


图 4 阿北凹陷欣苏木构造带油气成藏模式图
Fig. 4 Oil and gas enrichment mode of Sumu structure belt of Abei depression

2 地层测试技术的应用

通过以上综合地质分析,明确了阿北凹陷腾一下段发育大型扇三角洲砂体,储层好,且原油物性整体较好,仅在邻近腾一上段低熟油生油次洼的A60井区发育稠油油藏,其余地区均为稀油油藏。X16井完钻后,及时应用地层测试技术,进行了液性及产能分析和储层综合评价,折算产量日产油11.38 m³,且该区原油物性较好,进一步验证以上关于稠油分布的成藏认识,为后续井位的通过提供了保障。

2.1 测试工艺技术

本井采用MFE射孔联作+WDT无线传输测试工艺^[14-15],采用二开二关二开抽汲工作制度。封隔器坐封于872.68 m。以清水压井,测试前加垫水52.51 m (0.16 m³)。射孔采用102枪,超二代深穿透弹,装弹240发,发射率100%。WDT无线传输及时记录了随工具入井的电子压力计在地层测试期间压力及温度的动态变化。测试期间封隔器密封良好,开、关井操作准确,管柱无漏失。本次测试取得了完整的开关井压力曲线及地层参数。

2.2 液性及产能分析

本次测试总有效时间3 653 min,其中一次开井19 min,一次关井838 min,二次开井418 min,二次关井2 378 min。11月21日10:09第二次开井,抽汲时下加重杆双根至260 m遇阻,上下活动多次无效,起出检查,加重杆有稠油,油管内灌热柴油50 L,上下活动多次无效,遇阻深度260~200 m。17:05二关井。11月22日11:50反循环洗井,油管打压23 MPa,憋开反循环,12:00用加热80℃热水12 m³ (Cl⁻含量1 064 mg/L, pH=7)反洗井,洗井深度849.32 m,泵压1.0 MPa,排量0.1 m³/min,出口返

油1.9 m³(未扣气泡含水),返水10.1 m³。取样器放样压力0.1 MPa,油样1 200 ml。

计量罐内取得油样室内化验分析结果:油相对密度(20℃)0.876 9,黏度(50℃)39.03 mPa·s,含硫0.21%,含蜡14.1%,沥青质+胶质含量28.5%,凝固点为29℃。原油性质分析为低硫高含蜡多胶质原油。

从流动曲线上看(图5),压力一直处于上升形态,但后期有所变缓,主要是由于油质偏稠,随着液面上升,井筒内温度降低造成原油难以流动。因此,折算产量较低。最终根据二次开井早期120 min流动段,折算本井日产油11.38 m³,对应平均流压3.54 MPa,生产压差4.11 MPa,测试结论为油层。

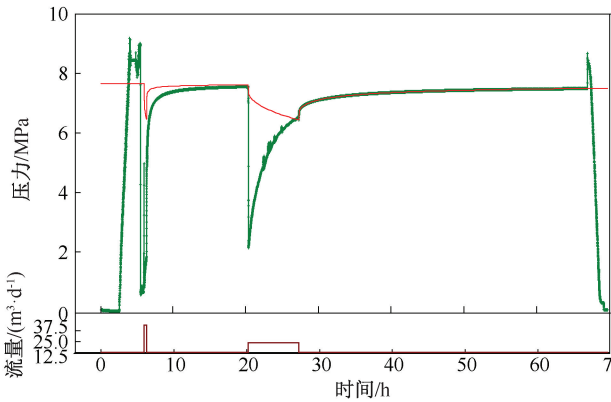


图 5 实测压力历史拟合图
Fig. 5 Matching diagram of measured pressure

2.3 储层综合评价

利用一次关井霍纳外推压力7.65 MPa,折算压力系数0.90(测点深度864.18 m),地层属正常压力系统。实测压力展开曲线反映,两次开井期间的自然流动阶段流压曲线上升较快,反映储层导流能力好,两次关井压力恢复曲线较快,反映储层导压能力强(图6)。双对数导数曲线显示径向流动段持续

较短(图7),后期呈持续上翘趋势至关井结束,反映储层横向上物性变差。根据曲线形态选用径向复合油藏模型进行拟合,求得油相有效渗透率为 $323 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表皮系数-1.14。参数结果表明储层渗透性较好,井筒附近基本无污染。从试油结果来看,影响储层产能低的主要原因是地层温度低,原油黏度大。

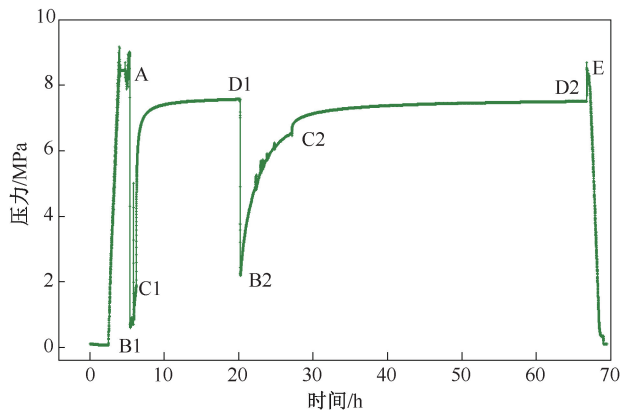


图6 实测压力历史图

Fig. 6 Measured pressure history chart

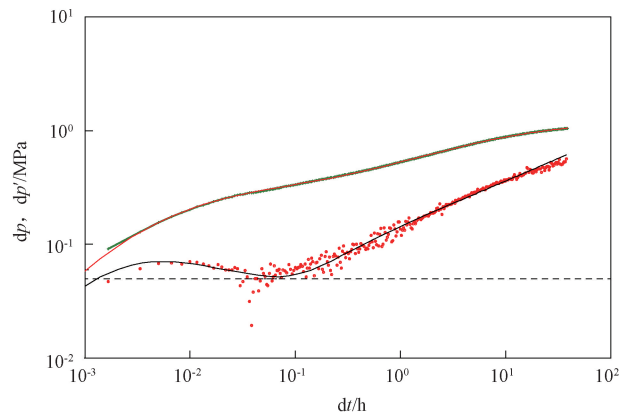


图7 二次关井双对数曲线拟合图

Fig. 7 Logarithmic curve fitting diagram of secondary shut-in

在X16井应用地层测试技术后,明确原油物性与储层物性,最终采取螺杆泵排液方式进行求产^[16-17],日产油 12.3 m^3 。

3 结论

(1)精细构造落实和烃源岩分析是阿北凹陷复杂构造区成藏研究的重点,而及时运用地层测试对储层和成藏认识进行有效验证和评价,最终指导试油获得高产,进一步证实地层测试技术是检验地质认识的有效手段。

(2)MFE射孔联作和低频电磁波无线传输试井技术在X16井成功应用,实时监测了井下测试数

据,对阿北凹陷储层和油藏进行及时真实、有效的评价,提高了现场施工效率,为该凹陷下一步勘探部署提供高效测试技术支持。但在日益复杂的地质条件下获取岩石和流体特性,急需深化和完善地层测试技术,应该将硬件研制与解释算法、软件开发、数值模拟、人工智能和各种测量数据与石油公司的工作流程有机地结合。

致谢:华北油田勘探开发研究院同意本论文公开发表。

参考文献

- [1] 崔周旗,吴健平,李莉,等. 二连盆地巴音都兰凹陷早白垩世构造岩相带特征及含油性[J]. 古地理学报,2001,3(1):25-34.
CUI Zhouqi, WU Jianping, LI Li, et al. Structure-petrographical zonation and their oil-bearing properties of the early cretaceous in Bayindulan sag, Erlian basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2001, 3(1):25-34.
- [2] 吴少波,白玉宝,杨友运. 内蒙古银根盆地地下白垩统沉积相[J]. 古地理学报,2003,5(1):36-43.
WU Shaobo, BAI Yubao, YANG Youyun. Sedimentary facies of the lower cretaceous of Yingen basin in Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2003, 5(1):36-43.
- [3] 梁官忠,谭建财,魏莉,等. 内蒙古二连盆地阿北凹陷下白垩统近岸水下扇沉积特征[J]. 古地理学报,2013,15(1):31-42.
LIANG Guanzhong, TAN Jiancai, WEI Li, et al. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans of the Lower Cretaceous in Abei sag of Erlian basin, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2013, 15(1):31-42.
- [4] 张嘉友,张勇,姜燕,等. 阿北凹陷复式油藏油气分布及聚集规律[J]. 内蒙古石油化工,2006(8):150.
ZHANG Jiayou, ZHANG Yong, JIANG Yan, et al. Distribution and accumulation of oil and gas in compound reservoirs in Abei sag [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006(8):150.
- [5] 刘忠宝,刘晓,苗峰,等. 阿北凹陷下白垩统阿尔善组水下扇沉积特征[J]. 沉积与特提斯地质,2005,25(3):57-61.
LIU Zhongbao, LIU Xiao, MIAO Feng, et al. Sedimentary features of the submarine fans in the lower cretaceous Arxan formation, Abei depression, Nei Mongol [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2005, 25(3):57-61.
- [6] 梁官忠,谭建财,魏莉,等. 内蒙古二连盆地阿北凹陷下白垩统近岸水下扇沉积特征[J]. 古地理学报,2013,15(1):31-42.
LIANG Guanzhong, TAN Jiancai, WEI Li, et al. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans of

- the lower cretaceous in Abei sag of Erlian basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2013,15(1):31-42.
- [7] 张以明,杜成良,李拥军,等. 中途裸眼坐封螺杆泵联作技术加快巴彦河套盆地吉兰泰凹陷新区太古界储层勘探发现[J]. 油气井测试,2018,27(3):34-39.
ZHANG Yiming, DU Chengliang, LI Yongjun, et al. Accelerating exploration discovery of Archaeozoic formation in Jilantai Sag of Bayanhetao Basin by combination test technology of DST and rod pump [J]. Well Testing, 2018,27(3):34-39.
- [8] 刘述忍,程晓东,赵政嘉,等. 杨税务高温潜山气藏测试射孔联作技术优化[J]. 石油钻采工艺,2018,40(2):185-189.
LIU Shuren, CHENG Xiaodong, ZHAO Zhengjia, et al. Optimization of test and perforation combination technology in Yangshuiwu high-temperature buried hill gas reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(2):185-189.
- [9] 张士川,陈燕,雷鹏,等. 应用天然气密闭燃烧装置提高杨税务潜山气藏试气安全环保质量[J]. 油气井测试,2020,29(4):18-23.
ZHANG Shichuan, CHEN Yan, LEI Peng, et al. Applying airtight combustion device for natural gas to improve the safety of gas testing and environmental quality in Yangshuiwu buried hill gas reservoir [J]. Well Testing, 2020,29(4):18-23.
- [10] 雷鹏,任永宏,姜居英,等. 裸眼选层锚测试工艺[J]. 油气井测试,2019,28(3):26-30.
LEI Peng, REN Yonghong, JIANG Juying, et al. Testing technology of open-hole layer selection anchor [J]. Well Testing, 2019,28(3):26-30.
- [11] 王鑫鑫,霍丽丽,张辉,等. 利用地层测试资料指导低渗透砂岩储层压裂改造选层[J]. 油气井测试,2020,29(5):54-60.
WANG Xinxin, HUO Lili, ZHANG Hui, et al. Application of formation test data to guide fracturing candidate for low-permeability sandstone reservoirs [J]. Well Testing, 2020,29(5):54-60.
- [12] 温杰文. 超深小井眼地层测试工艺技术研究及应用[J]. 钻采工艺,2019,42(6):50-53.
WEN Jiewen. Research and application of formation test technology in ultra-deep slimholes [J]. Drilling & Production Technology, 2019,42(6):50-53.
- [13] 邢晓光,许泽君,戴南燕,等. 冀东油田地层测试工艺研究与优化[J]. 油气井测试,2014,23(6):40-42.
XING Xiaoguang, XU Zejun, DAI Nanyan, et al. Research and optimization to well test technology in Jidong Oilfield [J]. Well Testing, 2014,23(6):40-42.
- [14] 王雪飞,谭忠健,翟洪君,等. 海上探井测试交互式试井技术[J]. 油气井测试,2019,28(1):32-37.
WANG Xuefei, TAN Zhongjian, ZHAI Hongjun, et al. Interactive well test technology for offshore exploration wells [J]. Well Testing, 2019,28(1):32-37.
- [15] 吴秋来,高硕,刘勇,等. 类“DTMF”井下远距离有缆数据传输方法研究[J]. 通信技术,2015,48(9):1023-1026.
WU Qiulai, GAO Shuo, LIU Yong, et al. The research of a long-distance data transmission method similar to “DTMF” [J]. Communications Technology, 2015,48(9):1023-1026.
- [16] 高辉. 螺杆泵与水力泵在水平井排液求产中的适应性分析[J]. 油气井测试,2018,27(3):22-27.
GAO Hui. Adaptability analysis of screw pump and hydraulic pump during the production of horizontal wells [J]. Well Testing, 2018,27(3):22-27.
- [17] 薛清祥,刘攀峰,杨建林,等. 螺杆泵与喷射泵在水平井措施排液中的对比应用[J]. 油气井测试,2016,25(2):61-63.
XUE Qingxiang, LIU Panfeng, YOU Qiuyan, et al. Contrast and application of screw pump and jet pump in drainage measures to horizontal well [J]. Well Testing, 2016,25(2):61-63.

编辑 王 军

第一作者简介:张宇飞,男,1989年出生,工学硕士,工程师,2017年毕业于长江大学地球物理与石油资源学院地球探测与信息技术专业,现从事石油地质综合研究工作。电话:0317-2721220,15231679302; Email: yjy_zhangyf@petrochina.com.cn。通信地址:河北省沧州市任丘市会战道局机关小区2号办公楼,邮政编码:062550。