

# 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

张以明<sup>1</sup>, 杜成良<sup>2</sup>, 李拥军<sup>1</sup>, 杨皓<sup>2</sup>, 王少春<sup>1</sup>, 刘述忍<sup>2</sup>, 雷鹏<sup>2</sup>

1. 中国石油华北油田公司 河北任丘 062552

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: liushuren@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“华北油田上产稳产 800 万吨关键技术研究与应用”(2017E035)、中国石油集团渤海钻探工程有限公司重大研发项目“冀中北部深潜山超高温钻完井及储层改造技术研究”(2018ZD01K-03)

引用: 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.

Cite: ZHANG Yiming, DU Chengliang, LI Yongjun *et al.* Accelerating exploration discovery of Archeozoic formation in Jilantai Sag of Bayanhetao Basin by combination test technology of DST and rod pump [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 34-39.

**摘要** X井是华北油田公司勘探事业部在巴彦河套盆地的第一口地质钻井井, 钻进至 672.12~728.62 m 时发现油气显示。为了快速落实裸眼段的真实液性和产能, 在充分认识裸眼井段太古界片麻岩井壁稳定的基础上, 采用划眼通井和双井径测井技术, 确定了裸眼封隔器坐封位置, 实施了中途裸眼坐封螺杆泵联作测试, 裸眼井段坐封测试 80 h, 远远超过地层测试规程规定的最长时间 24 h。测试资料解释和取样化验结果表明, 裸眼段储层为油水同层, 日产油 2.84 m<sup>3</sup>, 日产水 10.65 m<sup>3</sup>, 达到工业油流标准; 油相有效渗透率为 48.96×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 属于中等渗透储层; 表皮系数为 12.94, 井筒周围存在污染; 压力系数为 0.901, 属于正常地层压力系统。中途裸眼坐封螺杆泵联作技术提高新区勘探时效, 为埋藏浅、压力系数低、井温低和岩性稳定的太古界储层中途测试提供可借鉴方法。

**关键词** 河套盆地; 吉兰泰凹陷; 太古界; 中途测试; 螺杆泵; 液性; 产能; 地层压力

**中图分类号**: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.006

## Accelerating exploration discovery of Archeozoic formation in Jilantai Sag of Bayanhetao Basin by combination test technology of DST and rod pump

ZHANG Yiming<sup>1</sup>, DU Chengliang<sup>2</sup>, LI Yongjun<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>2</sup>, WANG Shaochun<sup>1</sup>, LIU Shuren<sup>2</sup>, LEI Peng<sup>2</sup>

1. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

2. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** Well X is the first geological drilling well by the Exploration Department of Huabei Oilfield Company in Bayanhetao Basin. There has showed indication of oil and gas in the open hole ranging from 672.12m to 728.62m. Combination test technology of DST (drill stem test) and rod pump was used to determine the real liquid property and productivity of this open hole and the packer setting position was determined by means of reaming down and dual caliper logging based on the cognition of the hole stability of the gneisses in Archeozoic formation. The test last for about 80 h which was much longer than the setting period provided by the provision of formation test. The interpretation of the test data and sample analysis results show that the formation is oil-water bearing layer with the productivity of the oil production rate of 2.84 m<sup>3</sup> and the water production rate of 10.65 m<sup>3</sup> and the productivity reaches the industrial standard; the formation is medium-permeable with the oil effective permeability of 48.96×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>; The formation damage occurs around the wellbore in account of the skin factor of 12.94; the pressure system is normal for the pressure factor of 0.901. This combination test technology of DST and rod pump accelerates the discovery of new area exploration and provides some references to the DST in Archeozoic formation with less burial depth, low pressure coefficient, low temperature and hole stability.

**Keywords:** Hetao Basin; Jilantai Sag; Archeozoic; drill stem test; rod pump; liquid property; productivity; formation pressure

X井是华北油田公司勘探事业部在巴彦河套盆地的第一口地质钻井井, 地质构造属于巴彦河套盆

地吉兰泰凹陷庆格勒图潜山构造。X 井位于河套盆地南部吉兰泰凹陷吉西凸起区,工区为典型的沙漠地貌,地形整体较为平缓,海拔 1 000~1 200 m,局部高差可达 40~50 m。河套盆地是中新生代叠合盆地,自下而上发育太古界、中生界、新生界地层。吉兰泰凹陷目前共有钻井 3 口,地质钻孔 5 口,太古界是主要勘探目的层之一,钻遇岩性主要为花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩和石英云英岩,似层状、互层产状,接触界限多为渐变过渡,显示较强的混合岩化作用。储集空间中构造裂缝较为发育,裂缝发育程度分布不均,宽窄不一,且大多为斜缝,直立缝次之,发育构造角砾岩带,局部见溶蚀晶洞以及破碎粒间孔隙,有利于原油储存。该井 436.60~729.16 m 井段为裸眼段,根据钻井、录井和测井数据显示,675.4~677.0 m 井段岩性为石英云英岩,电阻率在  $229.2\Omega\cdot\text{m}$  左右,孔隙度 8.8%,为 I 类储层。为了快速落实液性和产能,采用中途测试技术对裸眼井段进行了地层测试。

中途测试技术作为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<sup>[1-2]</sup>,其中 2017 年华北油田共开展中途测试施工 14 井层。其他油田也有中途测试的报道,该技术为油气田的高效勘探提供了前期的基础资料<sup>[3]</sup>。

针对胜利油田中途测试工具选择问题,卢继峰等针对胜利油田储层特点提出井深小于 3 500 m 且泥浆密度小于  $1.5\text{ g/cm}^3$  时,选用 MFE 工具,井深大于 3 500 m 时或泥浆密度较高时,选用 HST 工具;井温高于  $260\text{ }^\circ\text{C}$  时采用动力黏度为  $1\ 000\text{ mPa}\cdot\text{s}$  的硅油作为延时油,在施工完成的 23 口井 24 个测试层中,有 6 个层经测试获得高产油气流<sup>[4]</sup>;丁海峰报道了胜利油田 2005~2007 年在王 143 井、王古 7 井、坨 174 井、官 174 井、官 14 井和官 119 井等 5 口井的长裸眼中途测试,通过优选钻井液体系,保证了中途测试的成功<sup>[5]</sup>;彭志海等在分析胜利油田长裸眼中途测试风险和可行性的基础上,从泥浆、坐封位置、井底、管柱结构及测试工作制度等方面提出了解决办法,并利用 3 口典型实例井证明了解决办法的正确性<sup>[6]</sup>。另外,闫燕华等也针对胜利油田 2005~2007 年期间施工的 40 多口中途测试井,在分析影响测试施工质量的主要因素基础上,从测试阀、封隔器、密封件、管柱结构、测试压差和测试制度等 6 个方面提出了优化和改进措施,并报道了高

温高压超深井 SLBG402 井的成功案例<sup>[7]</sup>。

针对吉林油田气田,朱礼斌等在松辽盆地长深 1 井实施了中途测试、完井测试和系统试井,中途测试采用“坐套测裸”方式,对该井不同测试阶段储层污染程度有了清晰的了解,中途测试技术能快速认识储层,为勘探决策提供了重要依据<sup>[8]</sup>;之后,王立军等对该油田长深 1 号气田上的第一口深层水平试验井进行了中途测试,采用的坐封测试方式同样是“坐套测裸”,工艺一次成功<sup>[9]</sup>。凌立苏等针对准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层,分别设计了“坐套测裸”和“坐裸测裸”两种测试方式下的中途测试管柱,有效指导了后期完井方式和压裂改造的针对性<sup>[10]</sup>。

杨晓龙等通过研究国内油气田 152.4~311.15 mm 裸眼井规格范围内多口实测井的中途测试情况,分析坐套测裸、裸眼支撑、裸眼支撑式跨隔、膨胀式跨隔等主要中途测试方式设计方案的异同,归纳总结出裸眼中途测试设计的核心要素包括井眼准备、测试选层、地层压力预测及测试压差设计、工作制度选择<sup>[11]</sup>。任超群等介绍了 Mini-DST 测试及解释技术在海上低渗探井中的应用<sup>[12]</sup>。在国外油田中, Baytok S. 等介绍了基于两口临井的中途测试数据,采用岩石学和振幅随炮检距变化技术确定土耳其东南部 Diyarbakir 盆地一口探井的含油性<sup>[13]</sup>; APERDOMO E. 等利用中途测试技术评价了 X 凝析气田中 Y 井的物性和产能<sup>[14]</sup>。从前人的研究和报道可以看出,中途测试技术在油气田勘探阶段得到了广泛的应用。除此之外, Güney A. 等还将中途测试技术成功应用于土耳其的 9 口地热井中,获得了地热井的温度参数和其他储层参数<sup>[15]</sup>。以上报道的中途测试技术大多倾向于获取地层参数,除了自喷井以外,由于测试时间有限,很少有井能够获得储层的真实液性;同时,未见有关井深小于 1 000 m 的井进行中途测试的报道。

因此,根据 X 井所在巴彦河套盆地吉兰泰凹陷庆格勒图潜山构造的地质特征,设计了一次“坐裸测裸”的 MFE 裸眼支撑中途测试、一次“坐套测裸”的螺杆泵排液测试和一次“坐裸测裸”的中途裸眼坐封螺杆泵联作测试三种方案,成功取得了关井恢复压力数据和真实流体样品,明确了该井裸眼井段储层的真实液性和参数,加快新区勘探发现。

## 1 MFE 裸眼支撑中途测试

根据行业标准《SY/T 5483-2017 常规地层测试

技术规程》对 X 井 675.80~729.16 m 井段设计中途测试方式、工作制度和管柱组合的施工方案,并按照施工方案进行现场施工,分析测试数据和取得样品,落实储层液性和求取地层参数<sup>[16]</sup>。

## 1.1 测试工艺

### 1.1.1 井眼准备及封隔器坐封位置选择

为了对 X 井具有油气显示的 675.80~729.16 m 裸眼井段进行测试,封隔器坐封位置越接近目的层顶部越好。从 436.60 m 至井底为裸眼段,裸眼井段片麻岩为岩性,选择测试工艺为“坐裸测裸”方式的中途测试工艺。测试前用原井眼钻头正划眼通井至井底,充分利用钻井液循环洗井,然后进行双井径测井。在双井径测井曲线上距离 675.8 m 即储层顶界面最近的曲线重合的井段为 671.0~674.0 m,故选择 672.5 m 处为坐封位置<sup>[17-18]</sup>,实际封隔器坐封位置为 672.15 m。该位置井径为 225 mm,井浅温度低,封隔器胶筒外径与裸眼井径之间的间隙选择外径为 195 mm 和邵氏硬度为 70 的软胶筒。

### 1.1.2 测试管柱选择

针对 X 井裸眼井段片麻岩岩性,根据井况及测试目的,确定以评价储层流体性质和自然产能为测试原则,在确保井下安全的前提下优化测试管柱。由于坐封位置距离井底仅 56.01 m,选择测试工艺为“坐裸测裸”的 MFE 裸眼支撑中途测试工艺,由于井深较小井温较低,将 MFE 测试阀的液压油用柴油进行稀释,缩短延时时间<sup>[19]</sup>。为避免封隔器在开关井过程中失封,选择钻铤作为支撑尾管。中途测试管柱结构组成为钻杆+泵冲式反循环接头+钻杆+断销式反循环接头+加重钻杆+变扣接头+MFE 测试阀+裸眼旁通+TR 震击器+压力计托筒+变扣接头+钻铤+变扣接头+安全接头+安全密封+裸眼封隔器+重型筛管+变扣接头+钻铤。

### 1.1.3 测试压差及工作制度选择

中途测试以求取流体性质为目的,兼顾对地层压力和产能的获取。测试制度为一开一关,一开时间 213 min,泡泡头气泡显示较强,环空液面不降。关井恢复时间 509 min,本次测试总有效时间为 722 min。由于井浅,测试前钻杆内全部掏空,不加液垫,测试压差为 0。

## 1.2 测试结果分析

### 1.2.1 液性和产能分析

测试结束管柱回收液量 1.57 m<sup>3</sup>,其中油 0.31

m<sup>3</sup>,混浆 1.26 m<sup>3</sup>;MFE 取样器容积 2 500 mL,放样压力 0.3 MPa,取油样 2 200 mL,混浆 300 mL,气微量。开井期间,井筒中主要为原油和泥浆水的混合物,且测试过程中无液垫,采用一开流压折日产液 7.13 m<sup>3</sup>,对应平均流压为 1.26 MPa,生产压差为 4.30 MPa。取样样品 88%为原油,12%为混浆水,且氯根为 5 503 mg/L,与钻井液氯根 5 325 mg/L 基本相同,且回收物中也有原油,从而认为地层产出流体主要为原油。原油化验结果为:原油含硫量 2.34%,含蜡量 5.45%,胶质+沥青质含量 34.65%,20℃相对密度 0.894 4,地层条件下原油黏度 13.31 mPa·s,根据《SY/T6169-1995 油藏分类》划分标准,为低含硫、低含蜡、胶质中粘轻质油,原油品质较好。根据中国石油天然气行业标准《SY/T6293-2008 勘探试油工作规范》划分标准,该层测试结论为暂定油层。

### 1.2.2 储层参数

该井实测压力历史图如图 1 所示。由图 1 可以看出,开井流压曲线整体呈现明显上升趋势,在开井约 0.82 h 后的压力上升曲线形态较之前明显变缓,关井曲线形态表明储层渗流能力较好。利用一次关井压力恢复数据进行霍纳外推求取储层压力<sup>[20]</sup>,得到测点 629.06 m 的地层压力为 5.56 MPa,地层压力系数为 0.901,属于正常地层压力系统。

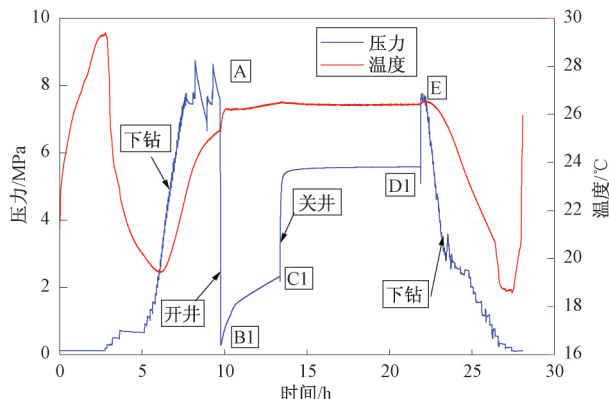


图 1 X 井 MFE 裸眼支撑中途测试实测压力曲线  
Fig.1 Pressure curve measured in MFE DST supported in open hole of well X

为了获得储层参数,对一关井期间的压力恢复数据进行了双对数拟合,拟合曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出,双对数曲线早期呈现平行“双轨”特征,反映储层井筒附近有微裂缝存在,与测井解释结果相吻合,持续 2.5 个对数周期后出现过渡段,经过 1 个对数周期的过渡段后出现径向流直线段,并持续到关井结束。选用“变井储+无限传

导垂直裂缝+均质无限大油藏模型”进行拟合,获得油相有效渗透率  $48.96 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,表皮系数 12.94,油相地层系数  $1491.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ ,探测半径 66.69 m。由此表明该储层属于中渗透地层,储层横向均质特征明显,探测范围内孔缝发育相对均匀,地层存在污染。

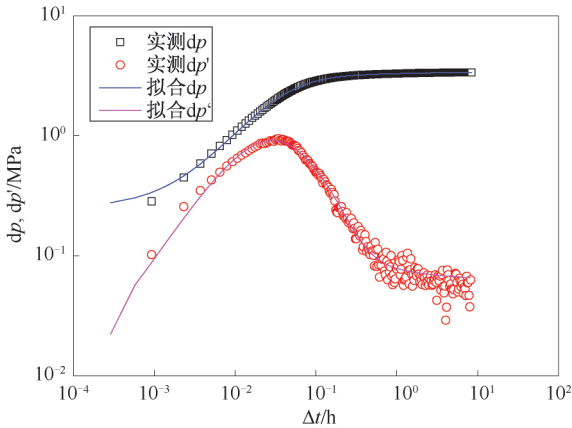


图 2 X 井中途测试一次关井期间双对数拟合曲线  
Fig.2 Matching curves in log-log chart during build-up of DST of well X

通过本次 MFE 裸眼支撑中途测试,认为裸眼段储层供液能力较强,井筒周围存在污染,原油性质属于中粘油。建议对本次测试的裸眼段储层进一步进行人工助排,落实地层真实产能。

## 2 螺杆泵排液测试

根据 MFE 裸眼支撑中途测试结果,有必要对裸眼段储层的液性和产能进一步落实。

### 2.1 螺杆泵排液测试工艺

根据行业标准《SY/T 5483-2017 常规地层测试技术规程》,对片麻岩岩性裸眼井段的坐封测试时间不能超过 24 h,为了对 X 井 675.80~729.16 m 井段进行螺杆泵排液测试,坐封位置选为 409.2 m 的套管中,防止测试时间过长造成卡钻等事故。因此,采用的工艺为“坐套测裸”的螺杆泵排液测试工艺<sup>[21]</sup>。管柱结构组成为钻杆+螺杆泵泵筒+钻杆+变扣接头+钻铤+变扣接头+RDS 循环阀+P-T 封隔器+电压接头+电压筛管+防落接头。

### 2.2 测试结果分析

图 3 为螺杆泵排液测试期间产油量和产水量曲线。由图 3 可以看出,4 月 22 日 8:55 至 5 月 8 日 12:30 泵排累计出水  $45.47 \text{ m}^3$ ,扣除井筒液  $13.84 \text{ m}^3$ ,地层累积产水  $31.63 \text{ m}^3$ ,出油  $5.42 \text{ m}^3$ 。根据 5 月 5 日 8:00-5 月 6 日 8:00 排液定产,日产油  $1.2 \text{ m}^3$ ,日

产水  $4.6 \text{ m}^3$ ,对应井底流压 1.44 MPa。水分析结果为:氯离子含量  $7444.5 \text{ mg/L}$ ,总矿化度  $12602.5 \text{ mg/L}$ ,水型为  $\text{CaCl}_2$ 。由于中途测试时 672.15 m 至井底井段地层没有产出水,并且本次排液测试产出水矿化度远高于中途测试的产出水,所以认为本次产出水来自上部井段 447.86~672.15 m。

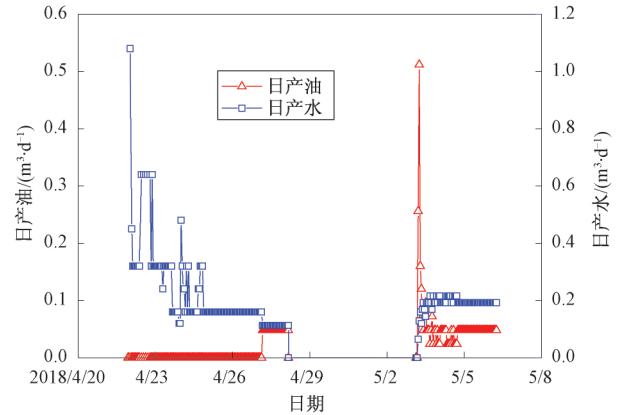


图 3 螺杆泵排液测试期间产油量和产水量曲线  
Fig.3 Oil and water production curves during rod pumping test

## 3 中途裸眼坐封螺杆泵联作测试

根据 MFE 裸眼支撑中途测试和螺杆泵排液测试结果分析,672.15 m 至井底井段地层为含油储层,没有地层水产出。由于 MFE 裸眼支撑中途测试开井时间较短,672.15 m 至井底井段地层是否产水仍存在一定的不确定性;如果该井段储层仅产油,则需要更长时间的排液测试求取更加精确的产能。因此,有必要对 X 井 672.15 m 至井底井段地层进行螺杆泵排液测试。

### 3.1 中途裸眼坐封螺杆泵联作测试工艺

由于片麻岩岩性相对坚硬,井壁稳定性好,MFE 裸眼支撑中途测试时封隔器解封顺利,且经过干划眼后测得的双井径曲线在距离储层顶界面(675.8 m)最近的 671.0~674.0 m 井段上重合,同时考虑本次测试的目的是测取 672.15 m 至井底井段地层的真实液性,所以坐封位置仍然和 MFE 裸眼支撑中途测试时相同。因此,采用的工艺为“坐裸测裸”的中途裸眼坐封螺杆泵联作测试工艺。管柱结构组成为钻杆+螺杆泵泵筒+钻杆+泵冲式反循环接头+钻杆+变扣接头+压力计托筒+TR 震击器+变扣接头+钻铤+变扣接头+安全接头+裸眼封隔器+重型筛管+变扣接头+钻铤。实际坐封位置 672.12 m,与第一次中测坐封位置 672.15 m 仅差 0.03 m,坐封成功。整个排液过程中,环空液面均匀下降,环空漏液量

1.75 m<sup>3</sup>, 平均漏速 0.071 4 m<sup>3</sup>/h, 环空漏失进入坐封位置以上裸眼段 447.86~672.12 m, 整个排液过程中封隔器密封。

### 3.2 测试结果分析

本次联作测试总有效时间为 57 h, 前 14 h 产出流体主要以泥浆为主, 随后 2 h 开始以油花+混浆水的形式产出, 在最后的 41 h 内, 地层产出流体主要为原油+清水。MFE 裸眼支撑中途测试时开井时间短仅 3.55 h, 产出水以混浆水为主, 水性受压井液影响较大, 对其来源判断困难, 同时由于水的氯根与钻井液氯根接近, 故认为判断产出水为非地层水。而对比 MFE 裸眼支撑中途测试和中途裸眼坐封螺杆泵联作测试的出水情况, 可以确定裸眼段 672.12~728.62 m 产出流体的液性为油水同出。图 4 为中途裸眼坐封螺杆泵联作测试期间产油量和产水量曲线。

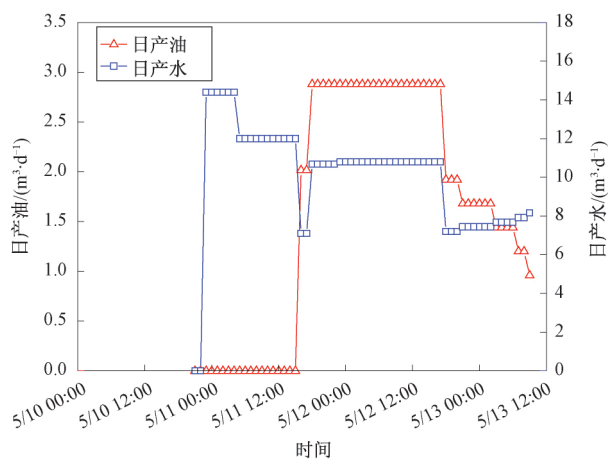


图 4 中途裸眼坐封螺杆泵联作测试期间产油量和产水量曲线

Fig.4 Oil and water production curves during combination test technology of DST and rod pump

由图 4 可以看出, 57 h 内累计排液 29.81 m<sup>3</sup>, 其中累产油 4.11 m<sup>3</sup>, 累产水 25.70 m<sup>3</sup>, 按照定产标准, 选择第 1 天 18:00 至第 2 天 17:00 排液定产, 日产油 2.84 m<sup>3</sup>, 日产水 10.65 m<sup>3</sup>, 达到工业油流标准, 对应井底流压 1.28 MPa, 裸眼段 672.12~728.62 m 最终确认为油水同层。

巴彦河套盆地吉兰泰凹陷之前钻出的松深 1 井和松深 2 井分别在 3240~3 340 m 和 2160~2 240 m 井段钻遇太古界片麻岩地层, 但是经过套管完井和固井后再进行试油测试, 未发现具有工业油流标准的产能。因此, 中途裸眼坐封螺杆泵联作测试技术在 X 井潜山裸眼储层成功实施, 快速落实了储层流体性质和地层参数, 减少了完井和固井带来的储层

伤害。

## 4 结论

(1) X 井是华北油田公司在巴彦河套盆地吉兰泰凹陷的第一口探井, 中途裸眼坐封螺杆泵联作测试技术首次在潜山裸眼储层的成功实施, 提高了新区勘探时效, 为该区块下一步勘探策略的制定和储层改造提供了基础数据。

(2) 在充分认识太古界片麻岩岩性井段井壁稳定的基础上, 采用划眼通井和双井径测井技术, 确定了中途裸眼坐封螺杆泵联作测试的坐封位置, 裸眼坐封测试时间达到 80 h, 远远超过地层测试规程规定的最长时间 24 h, 测试工具顺利起出, 落实了液性和产能, 为埋藏浅、压力系数低、井温低和岩性稳定的太古界储层中途测试提供了借鉴经验。

(3) X 井裸眼段 672.12~728.62 m 为中等渗透储层, 压力系数 0.901, 为了减少储层伤害, 应使用密度为 0.95 g/cm<sup>3</sup> 的无土相钻井液和近平衡钻井技术。该井段储层日产油 2.84 m<sup>3</sup>, 日产水 10.65 m<sup>3</sup>, 为油水同出层, 原油为低含硫、低含蜡、胶质中粘轻质油, 达到工业油流标准。

致谢: 感谢华北油田公司勘探事业部和渤海钻探油气井测试分公司同意本文公开发表; 感谢郑力会教授、王元龙副总工程师、徐凤兰主任、王东海队长、邵振鹏等在论文修改、施工总结和试井解释方面做出的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] KABIR A H, MCCALMONT S, JOHNSON R L. Reservoir characterisation of surat basin coal seams using drill stem tests [C]. Paper SPE 147828 presented at SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference & Exhibition, 20-22 September, 2011, Jakarta, Indonesia.
- [2] FEBRIANTO D H, RACHMAWATI F D, KHAN A *et al.* Drill-stem test with real-time reservoir data monitoring improves operational efficiency case study, Senoro-6 [C]. Paper SPE142682 presented at the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 25-28 September, 2011, Manama, Bahrain.
- [3] 左红军, 焦艳红, 王涛. 无线声波遥测钻杆(中途)测试技术[J]. 石油机械, 2016, 44(5):22-27.  
ZUO Hongjun, JIAO Yanhong, WANG Tao. Acoustic wireless telemetry drill stem test technology [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(5):22-27.
- [4] 卢继峰. 胜利油田深井、超深井中途测试技术改进与应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(6):65-66.  
LU Jifeng. Improvement and application of the open hole testing tech for deep super well in Shengli oilfield [J].

- Well Testing, 2011, 20(6):65-66.
- [5] 丁海峰. 长裸眼中途测试钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 38-41.  
DING Haifeng. Drilling fluid in drill stem test in long open hole [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 38-41.
- [6] 彭志海, 李玉忠, 盖玉磊, 等. 胜利油田中途裸眼地层测试分析[J]. 油气井测试, 2006, 15(3): 44-46.  
PENG Zhihai, LI Yuzhong, GAI Yulei *et al.* Analysis for open hole well testing tech in Shengli oilfield [J]. Well Testing, 2006, 15(3): 44-46.
- [7] 闫燕华, 张昌朝, 刘英. 高温高压超深井中途测试工艺的改进及应用[J]. 油气井测试, 2008, 17(4):41-42.  
YAN Yanhua, ZHANG Changchao, LIU Ying. Improvement and application of open hole testing tech in HT, HP and ultra-deep well [J]. Well Testing, 2008, 17(4):41-42.
- [8] 朱礼斌, 韩斌, 杨皓. 中途测试在长深1井储层认识中的作用[J]. 油气井测试, 2007, 16(6):25-27.  
ZHU Libin, HAN Bin, YANG Hao. Role of open hole testing to know reservoir of Changshen 1well [J]. Well Testing, 2007, 16(6):25-27.
- [9] 王立军, 王静波, 胡光, 等. 长深D平1井中途测试工艺研究与实践[J]. 油气井测试, 2009, 18(2): 42-43.  
WANG Lijun, WANG Jingbo, HU Guang *et al.* Study and practice of technology of drill stem test in well Changshen-D-Ping 1 [J]. Well Testing, 2009, 18(2): 42-43.
- [10] 凌立苏, 许江文, 王补信, 等. 中途测试技术在克拉美丽石炭系气藏的应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 47-50.  
LING Lisu, XU Jiangwen, WANG Buxin *et al.* Application of drill stem testing in the Kelameili Carboniferous gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 47-50.
- [11] 杨晓龙, 任永宏, 王义国. 裸眼中途测试设计优化研究[J]. 油气井测试, 2010, 19(4):42-43.  
YANG Xiaolong, REN Yonghong, WANG Yiguo. Optimization design and research on open hole test [J]. Well Testing, 2010, 19(4):42-43.
- [12] 任超群, 李文红, 杨柳, 等. Mini-DST测试及解释技术在海上低渗探井中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 29-31.  
REN Chaoqun, LI Wenhong, YANG Liu *et al.* Application of Mini-DST test and interpretation technology in low permeability exploration well in the sea [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 29-31.
- [13] BAYTOK S, DÜNDAR S, MUTAFCILAR M *et al.* Using rock physics and avo tools to determine hydrocarbon bearing zones in an exploration well, Diyarbakir Basin, Southeast Turkey [C]. Presented at the 19th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey, May 15, 2013.
- [14] APERDOMO E, CLEMENS T. Using pressure transient analysis to validate the initial hydrocarbon composition and improve hydrocarbon production forecasting, shown at an example rich gas condensate field [C]. Paper SPE 183107 presented at Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 7-10 November, Abu Dhabi, UAE.
- [15] GÜNEY A, HAKLIDIR T, AKIN T *et al.* Kizildere short term flow test: impact of new deep wells [C] // Proceedings of the Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011, 2013.
- [16] 石油地质勘探专业标准化委员会. 常规地层测试技术规程: SY/T 5483-2017[S], 2017.  
Standardization Committee of Petroleum Geological Exploration. Technology procedure of conventional drill stem testing: SY/T 5483-2017[S], 2017.
- [17] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1712-1724.  
LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian *et al.* Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [18] JUANDI D, ELBATTAWY A, RUSSO J *et al.* Using electrical borehole image log to optimize formation pressure sampling and its integration to determine structural/stratigraphic break in a tight carbonate reservoir at Karachaganak Field [C]. Paper SPE139942 presented at the SPE Caspian Carbonates Technology Conference, 8-10 November, 2010, Atyrau, Kazakhstan.
- [19] 叶荣. 美国江斯顿 MFE 地层测试器的性能研究[J]. 石油机械, 1981(5):23-29.  
YE Rong. Study on performance of MFE formation tester of Johnston [J]. China Petroleum Machinery, 1981(5):23-29.
- [20] 向蜀东. 平均压力的评价方法[J]. 油气井测试, 2014, 23(5):33-35.  
XIANG Shudong. Evaluation of average pressure [J]. Well Testing, 2014, 23(5):33-35.
- [21] 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, YANG Jianlin *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:张以明,男,1959年出生,博士,教授级高级工程师,2006年获中国科学院研究生院博士学位,现主要从事油气、煤层气勘探研究和管理工作。电话:0317-2551432; Email:ktb\_zym@petrochina.com.cn。地址:河北省任丘市会战南道华北油田公司,邮政编码:062552。