

# 海上深层潜山长裸眼地层测试技术

张金煌<sup>1</sup>, 杜连龙<sup>1</sup>, 张兴华<sup>2</sup>, 陈光峰<sup>1</sup>

1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司工程技术作业中心 天津 300452

通讯作者: Email: zhangjh75@cnooc.com.cn

引用: 张金煌, 杜连龙, 张兴华, 等. 海上深层潜山长裸眼地层测试技术[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 19-25.

Cite: ZHANG Jinhuang, DU Lianlong, ZHANG Xinghua, et al. Formation testing technology for long open hole in offshore deep buried-hill reservoirs [J]. Well Testing, 2024, 33(1): 19-25.

**摘要** 为安全高效评价渤海油田深层潜山油气藏, 从长裸眼段测试工艺、管柱、安全控制、压井技术等方面开展了细化研究。通过对比不同工艺优选出了“坐套测裸”+“生产测井”潜山测试工艺; 引入RD试压阀与RD旁通替液阀, 优化试压替液一体化测试管柱, 在传统测试管柱的基础上增加了试压、替液的功能; 选用PDF-HSD无固相测试液体系, 引进含砂实时监测装置, 通过控制压差有效地控制地层出砂; 引进有毒有害气体实时监测技术并在流程中加装实时除硫装置, 达到安全监控及除硫的目的; 长裸眼段测试压井技术有效保障了施工后的井控安全。经渤海油田3口井应用, 有效保障了作业安全, 均达到工业油气流, 成功获取地层测试资料, 顺利评价所在区域油气藏。该技术为类似深层潜山长裸眼储量解放提供了借鉴思路。

**关键词** 深层潜山; 长裸眼; 地层测试; 生产测井; 一体化管柱; 安全控制; H<sub>2</sub>S实时监测; 压井技术

中图分类号: TE27

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.004

## Formation testing technology for long open hole in offshore deep buried-hill reservoirs

ZHANG Jinhuang<sup>1</sup>, DU Lianlong<sup>1</sup>, ZHANG Xinghua<sup>2</sup>, CHEN Guangfeng<sup>1</sup>

1. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production Company, Tianjin 300452, China

2. Well Construction and Intervention Center, Tianjin Branch of CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300452, China

**Abstract:** For the safe and efficient evaluation of deep buried hill oil and gas reservoirs in Bohai Oilfield, detailed research has been carried out from the aspects of long open hole testing technology, tubing, safety control, and well killing technology. By comparing different processes, the “sitting in the casing to test the open hole” and “production logging” buried hill testing processes were optimized; Introducing RD pressure testing valve and RD bypass valve, optimizing the integrated testing string for pressure testing and liquid replacement, adding functions for pressure testing and liquid replacement on the basis of traditional testing string; Select the PDF-HSD solid-free testing fluid system, introduce a real-time monitoring device for sand content, and effectively control sand production in the formation by controlling the pressure difference. Introducing real-time monitoring technology for toxic and harmful gases and installing real-time sulfur removal devices in the process to achieve safety monitoring and sulfur removal goals. Long open hole section well killing technology effectively ensures well control safety after well testing. Through the application of three wells in Bohai oilfield, the operation safety has been effectively ensured, and industrial oil and gas flow have been achieved, successfully obtaining formation testing data. This technology provides a reference idea for the liberation of reserves in deep buried hill long open hole reservoirs.

**Keywords:** deep buried-hill; long open hole; formation testing; production logging; integrated pipe tubing; safety control; H<sub>2</sub>S real-time monitoring; well killing technique

随着渤海勘探目标的转移, 越来越多的深层潜山油气藏被发现, 潜山储层以裂缝型为主<sup>[1-2]</sup>, 如下套管固井将会很大程度上影响真实产能, 所以通常采用裸眼完井之后进行地层测试。深层潜山油气藏的测试评价通常具有以下难点: ①埋藏深、温度

高, 通常地层温度超过180℃, 对于井下工具考验极大; ②潜山顶部分多存在风化壳, 流体储集空间复杂, 疏松易出砂, 裸眼井况复杂<sup>[3-4]</sup>; ③潜山油气藏通常含有H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>等有毒有害复杂气体, 对测试设备及人员安全提出挑战; ④储层厚度大, 钻探裸眼段较

长,测试结束后压井时,裸眼段内油气无法循环出地面,当井下流体到达井口后容易造成井口风险,长裸眼段压井困难<sup>[5]</sup>。

温志平等<sup>[6]</sup>介绍了南海东部“坐套测裸”测试作业的工艺流程及应用情况;高科超等<sup>[7]</sup>针对海上油田深层潜山测试管柱技术进行了研究,提出了通过 RD 旁通试压阀和 RD TST 阀的配合使用,形成了深层潜山裸眼测试管柱技术;赵启彬等<sup>[8]</sup>针对海上高温高压的严苛测试环境造成的插入密封下插困难、环空温度、压力变化影响工具正常操作等问题,开展了测试工艺研究,在使用永久式封隔器的基础上,通过 RD 旁通试压阀和选择性测试阀的配合使用,成功地解决了插入式封隔器在下插过程中由于密闭空间压缩带来的插入阻力问题以及温度升高所带来的环空效应,使测试管柱更加安全。本文经过研究选用 RD 试压阀与倒置的 RD 旁通试压阀(下称 RD 旁通替液阀)组合使用,组成了“试压替液一体化管柱”,实现了全管柱试压及循环清洗管柱、替入诱喷液垫的功能。同时,还针对渤海油田深层潜山长裸眼地层测试,开展了测试期间的防砂控砂技术、有毒有害气体安全控制技术与长裸眼段测试压井技术研究,全方位保障了测试作业的安全性。

## 1 关键技术研究

海上勘探作业成本高,如何对潜山油气藏进行有效评价,既要取到必要的油田开发资料,又能达到降低成本、有效开发油田的目的,合适的测试技术是关键。

### 1.1 “坐套测裸”+“生产测井”潜山测试工艺

#### (1) 下套管固井测试

下套管固井后进行射孔测试的方法一般较为安全,但是由于本区潜山油气藏多为裂缝性储层,固井时存在水泥严重污染地层裂缝渗流通道,造成产能无法释放,测试失败<sup>[9]</sup>。

#### (2) 支撑式裸眼跨隔测试

这种方式是基于 MFE 测试工具的一种支撑在裸眼底部的跨隔测试工艺。根据 SY/T5483 标准规定,对于支撑尾管的长度要求不大于 150 m,对于跨隔测试跨距要求不大于 30 m,对于裸眼井段测试总时间(不包括起下测试管柱时间)控制在 16 h 以内<sup>[10-11]</sup>。对于渤海潜山储层裸眼长度普遍超过 500 m 的无法实现测试的目的。并且这种方式钻具

卡埋的风险很大。

#### (3) 水力扩张式封隔器跨隔测试

采用水力扩张式双封隔器下入裸眼中,使用井下液体打压或者地面打压的方式坐封封隔器后进行测试<sup>[12]</sup>。但因为目前水力扩张式封隔器耐温等级难以满足作业要求,且密封效果无法保障,故此方法不适用。

#### (4) 管外封隔器分层测试

采用遇油/遇水自膨胀管外封隔器或者水力扩张式管外封隔器配合套管串下入裸眼层段,坐封后不用进行固井,之后下入射孔测试联作管柱,进行射孔测试。但这种封隔器在潜山裂缝型裸眼储层环境中难以适用,封隔效果难以达到要求,且一旦失封将无法补救。

#### (5) “坐套测裸”+“生产测井”潜山测试工艺

因为深层潜山地质条件复杂,温度压力等级较高,上述裸眼跨隔测试方法并不适用。根据潜山储层为岩性相同、同一套压力系统的大厚层的特点,最终选择采用 APR 全通径测试工具配合高强度封隔器坐封在潜山裸眼上层套管中,对潜山储层进行笼统测试。在测试的过程中,配合高温生产测井方法在开井生产期间对裸眼层段进行生产测井,绘制裸眼储层产出剖面,定量划分有效储层段及产出贡献比,并找出油水界面<sup>[13]</sup>。

### 1.2 试压替液一体化测试管柱

由于深层潜山高温高压、伴生有毒有害气体等恶劣的作业环境,要求测试管柱在耐温耐压等级、气密性、防腐蚀性等方面能够达到作业要求,同时兼备传统测试管柱全通径、开关井、诱喷、资料录取等功能<sup>[14]</sup>。

如图 1 所示,深层潜山裸眼试压替液一体化测试管柱从下至上依次为:引鞋+存储压力计托筒+177.80 mm XHP-RTTS 封隔器+安全接头+震击器+液压旁通+双氮室 LPR-N 阀+RD 旁通替液阀+RD 试压阀+泄压阀+RD 循环阀(有球)+120.65 mm 气密防硫钻铤+RD 循环阀+伸缩接头+114.30 mm 气密防硫油管+127.00 mm 气密防硫钻杆。

试压替液一体化管柱中引进了 RD 试压阀与 RD 旁通替液阀,两种阀的组合能够实现全管柱分段试压、反循环清洗管柱、正替测试液垫三大功能。具体操作步骤为:管柱试压合格后通过环空压力操作试压阀打开,反循环清洗管柱,同时将下钻过程中窜到封隔器上部液体内的气体循环出去,最后正

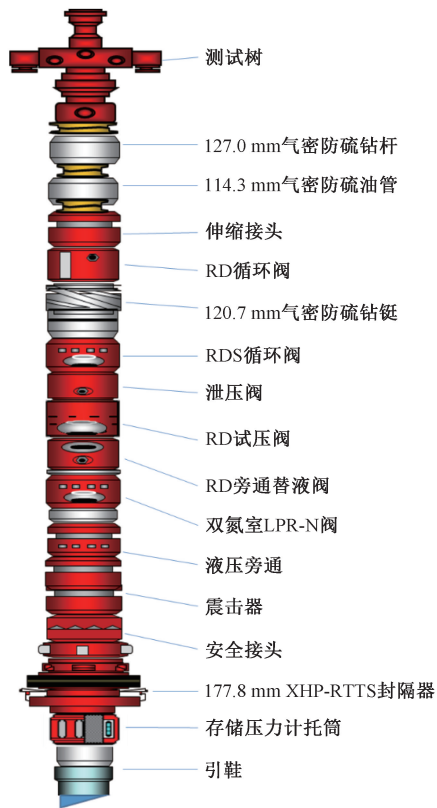


图1 深层潜山试压替液一体化测试管柱图

Fig. 1 Integrated pressure testing and liquid replacement string for deep buried hill formation testing

循环替入测试诱喷液垫至设计长度,再通过操作环空压力关闭 RD 旁通替液阀的旁通孔,下部球阀同时打开,实现测试开井诱喷的功能。

#### (1) RD 试压阀操作原理

根据环空液体静压及补充井口压力控制其阀状态,在坐封封隔器、安装好井口高压测试树对管柱整体试压合格后,环空加压击穿工具外部破裂盘,静压操作工具内部芯轴动作,打开球阀,实现全通路。具体环空操作压力可以根据测试液密度、阀体下深等参数细化计算。由于长裸眼测试井控风险较高,下钻过程中如遇紧急状态可就地坐封封隔器,环空加压打开 RD 试压阀实现建立循环通道。

#### (2) RD 旁通替液阀操作原理

根据环空液体静压及补充井口压力控制其阀状态,入井时该阀的状态为旁通孔打开,下部球阀关闭。在反循环清洗管柱及正循环替入诱喷液垫(通常采用柴油)后,环空加压击穿工具外部破裂盘,静压操作工具内部芯轴动作,关闭旁通孔的同时打开球阀,实现全通路。环空压力操作 RD 旁通替液阀的同时保持到双氮室 LPR-N 阀的开启压力,实现开井测试。

### 1.3 全流程控砂防砂技术

对潜山储层来讲,潜山顶部风化壳常为产能贡献较大的部位,但风化壳相对潜山内部储层地层较为疏松<sup>[15]</sup>,生产过程中容易出砂,存在一定程度出砂严重管柱卡埋的风险。为了降低这种风险,从测试液选型、井筒清洁、生产控砂防砂等方面做了相应研究,形成了全流程控砂防砂技术。

#### (1) 清洁型测试液体系

为了满足控砂的需求,测试液选用清洁型测试体系——PDF-HSD 无固相泥浆体系,该体系从钻井揭开储层开始,一直沿用到测试作业结束。

PDF-HSD 无固相泥浆体系采用无黏土和不溶固体加重材料进行加重,密度通过可溶性盐甲酸盐调整,其他主要性能通过添加聚合物维护<sup>[16]</sup>。甲酸半空盐体系具有很好的抑制性和抗温性能,与聚合物配伍性良好,并且可以在一定程度上提高聚合物的抗温性能<sup>[17]</sup>,满足深层潜山高温环境下的钻井及测试需求。

PDF-HSD 抗高温无固相泥浆体系基础配方为: 0.3% NaOH + 0.3%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 0.5% DFL200 (提黏剂) + 1% DFL180 (降失水剂) + 1% PF-SATRO-1 + HCOOK,用甲酸钾调整密度。

通过实验室评价,该体系具备抗高温等级能够达到 210 ℃,同时具备很好的抑制性、稳定性、流变性。在储层保护性方面采用低孔低渗岩心进行的驱替实验,渗透恢复率为 88.33%~93.33%,对低孔低渗型储层具有良好的油层保护效果。

#### (2) 井筒清洁控制

在完钻后循环调整泥浆性能,清除液体中的固相含量,确保泥浆性能及稳定性,满足测试作业要求,确保测试期间井眼内钻井液不发生固相沉淀。在测试前利用刮管管柱再充分循环清洗井筒,利用 API 140 目以上振动筛筛布再次清除固相颗粒,同时把控作业细节,清理振动筛、高架槽、泥浆池等循环流程,保障洗井质量。

#### (3) 生产压差控制

在地质资料录取方面,从合理控制诱喷压差、优化开关井制度等方面,实现测试全过程的控砂防砂工艺。

诱喷压差的确定:参考邻井潜山旋转壁心渗透率及声波测井纵波时差,根据经验公式计算诱喷压差,合理设计诱喷压差用于指导生产。

开关井制度的优化:通过油嘴控制井口压力。



其中初开井,合理控制生产压差,以地层不出砂为目的;二开井工作制度参考邻井产出情况,采用合理工作制度求产。终关井在二开井求产后直接打开 RD 安全循环阀,实现关井,同时迅速反循环清洗管柱,防止管柱中的砂粒沉降。

#### (4) 含砂实时监测技术

实时了解井口产出流体中的含砂量对于防砂控砂来讲十分重要<sup>[18]</sup>。通常情况下会在测试井口生产流程的转向处连接含砂实时监测装置(见图2),用来实时监测井口产出流体的含砂率,便于第一时间根据含砂情况做出判断,调整工作制度,控制生产压差,必要时可以进入应急程序。

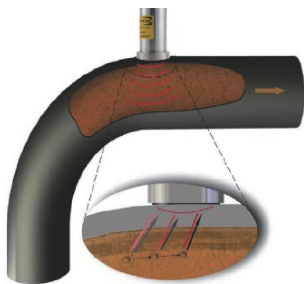


图2 含砂实时监测技术原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of real-time monitoring technology for sand content

该设备基于“超声波智能传感器”技术。这种传感器无需接触流体,安装在第一根弯头后面,流体在转向时,砂在此处从流体中被挤出,并碰击管壁的内壁,产生一种超声波脉冲信号。超声波信号通过管壁传输,并由声敏传感器接收。系统采用 DSP (Digital Signal Processor 数字信号处理器) 技术使其能够拥有先进的软件处理方法,从而改进信噪比并消除背景噪音。传感器接收到的信息再通过计算机软件的处理,得到含砂率的实时变化曲线。

#### 1.4 有毒有害气体安全控制技术

渤海油田深层古潜山储层除了埋藏深、压力大、温度高等特点,地层产出流体通常还含有硫化氢等有毒有害气体,给测试作业带来了很大的风险和挑战<sup>[19]</sup>。同时由于海上平台作业空间受限,一旦发生硫化氢气体泄漏会造成极大的危害,地面测试生产流程的安全控制就成为了亟需解决的难题<sup>[20-21]</sup>。在实际作业过程中,为了最大限度地降低风险,在保证测试地面流程密封性的基础上,一是应用硫化氢实时监测系统与特殊气体实时成像报警监测系统实时监测生产流程中与环境空气中的硫化氢含量;二是气液分离后,应用实时除硫装置向液体中添加硫化氢捕捉剂降低液体中溶解硫化

氢的含量,等离子自动点火装置保障含硫天然气的连续燃烧,两种方法相结合,创建出一套有毒有害气体安全控制技术,实施效果良好。

#### (1) 硫化氢实时监测技术

硫化氢实时监测装置是利用标准的硫化氢测定方法——醋酸铅色带比色法的原理实时监测硫化氢的含量的。该装置通过取样管路连接到分离器气出口的丹尼尔流量计处的稳流器后,吸取稳定流速和流态的含硫气体样品。样品经过降压处理后,使用装置内部的流量计调节样品流量,之后接触到醋酸铅测试带,再通过光电二极管检测器和 LED 光源发光系统产生输出信号,经数字化分析处理后,在显示器上实时显示当前浓度、报警状态、程序提示以及故障指示等信息。该装置的硫化氢测量范围在 0~100%。

#### (2) 特殊气体实时成像报警监测系统

特殊气体实时成像报警监测系统根据石油、化工等行业要求研发的一套报警系统,系统由气体检测变送器、报警控制单元、监控软件、网络系统、以及电源模块等附件组成,可实现现场检测、集中监控、报警提醒、历史记录等功能,能够及时发现现场各类可燃、有毒有害气体泄漏,通过声光报警等多级警示预防作业现场安全事故的发生,保障安全生产。

#### (3) 实时除硫装置

实时除硫装置由化学注入泵、高压管线和除硫混合器三部分组成。其中除硫混合器连接在三相分离器油管线出口处,在测试生产过程中,通过实时向除硫混合器中泵入除硫剂,与溶解在液体中的硫化氢产生化学反应,消除液体中硫化氢。可有效防止溶解在液体中的硫化氢在液体存储及转移的过程中析出,危害设备及人员安全。同时配合硫化氢监测系统反馈的硫化氢含量变化,可实时调整除硫剂的泵入量。

如图3所示,除硫混合器中设置了多级叶轮,同时除硫剂的注入方向与分离器液体排出管线流动方向垂直,进一步增加除硫剂与流体的接触面积和反应时间,提升除硫效果。经过除硫后的原油,再通过环保船回收转运的方式处理,以达到在安全的条件下实现经济利益最大化<sup>[22]</sup>。

#### (4) 等离子自动点火技术

对于含有毒有害气体的井,必须保证油气分离之后,气体能够不间断的燃烧,否则一旦有毒有害

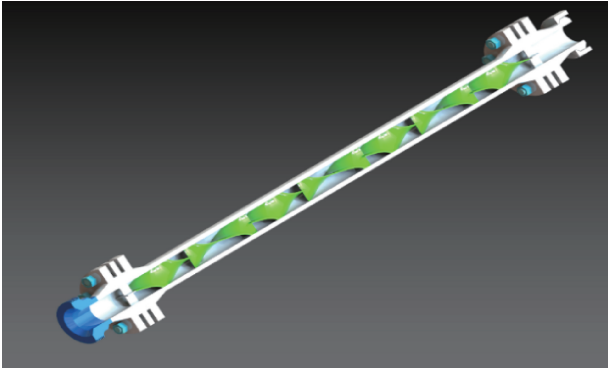


图 3 除硫混合器内部结构图

Fig. 3 Internal structure diagram of H<sub>2</sub>S removal mixer

气体逸散到空气中,对作业安全将会产生极大危害。但如果气体中二氧化碳成分较高时,将不利于气体连续燃烧。为了达到连续燃烧的效果,研发出等离子自动点火装置,主要由防爆等离子点火装置,高压点火线以及等离子点火枪等几部分组成,无需液化气等危险品助燃。该装置有自动和手动两种模式。在自动模式下,如果火焰检测器检测到火焰熄灭了,将会自动启动点火程序,两个点火器同时工作,等离子点火枪端头工作时会产生等离子电弧,等离子弧长约 100 mm,当点火枪把大火引燃后,火焰检测器看到大火的火焰燃烧,两个点火器停止工作,着火指示灯亮起。

等离子自动点火技术采用高性能的点火电路,性能稳定,工作可靠,有效保障了测试作业中可燃、有毒有害气体的连续燃烧,消除其对环境和安全的危害。

1.5 长裸眼段测试压井技术

长裸眼测试结束后,裸眼段内全部充满着油气,如果采用常规的压井技术实施压井非常困难,井控风险极高。如果储层为气层,这种风险将会变得更大。大量的气体聚集在封隔器之下,解封之后,高压气体会快速上窜,极大增加了后续压井作业难度,如果处理不当将会造成巨大的安全风险与生命财产损失<sup>[23]</sup>。为了能够实现安全压井起钻,结合试压替液测试一体化管柱特点,采用“平推法”与“正反循环”相结合,形成新的长裸眼段测试压井技术,具体作业步骤如下<sup>[24]</sup>:

- (1) 测试结束后关闭井下测试阀,打开测试树生产翼阀放压,将测试管柱内压力及油气放空,关闭油嘴管汇;
- (2) 然后打开测试树压井翼阀,用固井泵泵入钻井液灌满测试管柱;

(3) 环空加压打开井下测试阀,继续用固井泵将管柱内及裸眼段剩余油气挤入地层,然后再泵入 2 倍裸眼段容积压井液;若地层漏失严重,继续泵注堵漏浆并顶替至裸眼段内堵漏;

(4) 解封封隔器,反循环压井,快速将封隔器以下剩余油气循环出地面,有效避免压井液气侵;

(5) 正循环压井,调整压井液性能,直至监测气全量持续小于 2%;

(6) 停泵 6~8 h,期间进行起下管柱模拟起钻,之后继续循环测后效气及气窜速度,确认无后效,起出测试管柱。

2 现场应用

通过对深层潜山长裸眼地层测试关键技术研究,形成了深层潜山长裸眼地层测试技术体系,并在近年来渤海深层潜山勘探测试评价过程中广泛应用,取得了良好的评价效果(见表 1)。其中 BH13A 井完钻井深 4 800 m,测试裸眼段长 320 m,地层温度 170 ℃;BH19B 井完钻井深 5 500 m,测试裸眼段长 921 m,地层温度约 190 ℃;BH21C 井完钻井深 5 384 m,测试裸眼段长 453 m,地层温度 181 ℃。三口探井均采用“坐套测裸”测试工艺,井下管柱选用“试压替液一体化”测试管柱,测试作业过程中运用全流程控砂防砂技术及有毒有害气体安全控制技术,测试结束时采用长裸眼段压井技术,保障了作业安全,最终成功获取地层测试资料,顺利评价所在区域油气藏。并在这个过程中,三口井回收原油超过 700 m<sup>3</sup>,创造直接经济价值超过 300 万元。

表 1 三口井长裸眼段潜山地层测试技术应用井产量对照表

Table 1 Comparison table of production of three long open hole buried hill formation testing technology application wells

井名	求产油嘴	平均油	平均气	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
		日产/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	日产/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	含量/%	含量/ ppm
BH13A	9.53 mmPC	245.23	106 518	5.72 ~ 6.11	18~19
BH19B	13.49 mmPC	338.76	331 803	7.61 ~ 7.83	53~55
BH21C	7.94 mmPC	/	155 927	49 ~ 59	52~70

3 结论

(1)形成了“试压替液一体化”测试管柱,在传统测试管柱功能的基础上,增加了试压、替液的功能;创建了有毒有害气体安全控制技术,可以实时监测并消除流程中有毒有害气体;采用“平推法”与

“正反循环”相结合创建长裸眼段测试压井技术。

(2)经过多项技术研究,形成了成熟的深层潜山长裸眼地层测试技术体系,有效解决了深层潜山勘探评价的高温高压、长裸眼段、有毒有害气体环境等难题。

(3)该技术在渤海油田潜山勘探领域应用效果良好,对渤海油田诸多深层潜山油气藏储量认证工作起到了很大的积极推动作用,为同类型深层潜山油气藏地层测试提供了技术思路,具有一定的借鉴意义。

**致谢:**感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司工程技术作业中心为该文提供技术把关。

#### 参考文献

- [1] 施和生,王清斌,王军,等. 渤中凹陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019,24(1):36-45.  
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag [J]. China Petroleum Exploration, 2019,24 (1): 36-45.
- [2] 徐长贵,侯明才,王粤川,等. 渤海海域前古近系深层潜山类型及其成因[J]. 天然气工业,2019,39(1):21-32.  
XU Changgui, HOU Mingcai, WANG Yuechuan, et al. Type and genesis of Pre-Tertiary deep buried hills in the Bohai Sea area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (1): 21-32.
- [3] 周东红. 渤海油田深埋潜山储层预测关键技术研究——以渤中 19-6 潜山为例[J]. 中国海上油气,2021,33(3):69-76.  
ZHOU Donghong. Research on key technologies of deep buried hill reservoir prediction in Bohai oilfield: A case study of BZ19-6 buried hill [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021,33 (3): 69-76.
- [4] 侯明才,曹海洋,李慧勇,等. 渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019,39(1):33-44.  
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (1): 33-44.
- [5] 罗冰,张华卫,陈心进. 也门 71 区块长裸眼段气井测试后压井技术[J]. 石油钻探技术,2015,43(6):98-102.  
LUO Bing, ZHANG Huawei, CHEN Xinjin. An integrated well killing technology applied after gas well testing in long open hole in Block Yemen 71 [J]. Petroleum Drilling Technology, 2015,43 (6): 98-102.
- [6] 温志平,李纪智,夏竹君,等. 南海东部“座套测裸”测试技术及应用[J]. 石化技术,2021,28(1):63-64.  
WEN Zhiping, LI Jizhi, XIA Zhujun, et al. Testing technology and application of “bare seat cover” in the east of South China Sea [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021,28(1):63-64.
- [7] 高科超,冯卫华,吴轩,等. 海上油田复杂气井深井测试管柱的应用与研究[J]. 油气井测试,2016,25(1):54-57.  
GAO Kechao, FENG Weihua, WU Xuan, et al. Research on openhole testing string for deep buried hill formation at offshore oilfield [J]. Well Testing, 2016,25 (1): 54-57.
- [8] 赵启彬,刘振江,王尔钧. 海上高温高压井测试工艺优化研究[J]. 钻采工艺,2015,38(1):32-34.  
ZHAO Qibin, LIU Zhenjiang, WANG Erjun. Improvement and application of offshore hpht well testing technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015,38 (1): 32-34.
- [9] 孙云鹏,罗淮东,曲兆峰,等. 乍得潜山油藏裸眼试油技术[J]. 油气井测试,2019,28(2):27-32.  
SUN Yunpeng, LUO Huaidong, QU Zhaofeng, et al. Oil testing technology for open hole in buried hill reservoir, Chad [J]. Well Testing, 2019,28 (2): 27-32.
- [10] 王文广,罗淮东,孙云鹏,等. 潜山长裸眼段分层测试方案在 BC02 井优化实施[J]. 油气井测试,2016,25(5):58-62.  
WANG Wenguang, LUO Huaidong, SUN Yunpeng, et al. Optimized implementation of layered test plan in BC02 well with long open hole section of buried hill [J]. Well Testing, 2016,25 (5): 58-62.
- [11] 窦益华,吕维平,张福祥,等. 支撑式跨隔测试管柱力学分析及其应用[J]. 石油钻采工艺,2007(4):106-109.  
DOU Yihua, LYU Weiping, ZHANG Fuxiang, et al. Mechanical analysis of support anchor straddle packer test tubular string and its application [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007 (4): 106-109.
- [12] 窦益华,杨浩,李明飞,等. 水力扩张式封隔器胶筒力学性能有限元分析[J]. 油气井测试,2016,25(2):6-9.  
DOU Yihua, YANG Hao, LI Mingfei, et al. Mechanical characteristics analysis of hydraulic expandable packer rubber with finite element method [J]. Well Testing, 2016,25 (2): 6-9.
- [13] 谭忠健,项华,刘富奎,等. 渤海复杂油气藏测试技术研究及应用效果[J]. 中国海上油气,2006,18(4):223-228.  
TAN Zhongjian, XIANG Hua, LIU Fukui, et al. Testing techniques for complex reservoirs and their application in Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006,18 (4): 223-228.
- [14] 刘境玄,张兴华,周道禧,等. 改进型测试工具在渤海深层裸眼测试中应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022,42(9):91-94.  
LIU Jingxuan, ZHANG Xinghua, ZHOU Daoxi, et al. Application of improved testing tool in deep open hole



- testing in Bohai sea [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2022,42 (9): 91-94.
- [15] 牛涛,范洪军,范廷恩,等. 渤中 19-6 气田太古界变质岩潜山“隔夹层”成因及发育模式[J]. 大庆石油地质与开发,2021,40(4):1-8.
- NIU Tao, FAN Hongjun, FAN Ting'en, et al. Genesis and development pattern of the interlayer in Archeozoic metamorphic-rock buried hill of Bozhong 19-6 Gas Field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40 (4): 1-8.
- [16] 李刚,何瑞兵,范白涛,等. PDF-HSD 钻井液体系在渤海科学探索井的应用[J]. 断块油气田,2012,19(3): 373-377.
- LI Gang, HE Ruibing, FAN Baitao, et al. Application of PDF-HSD drilling fluid in scientific exploitation well of Bohai Oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19 (3): 373-377.
- [17] 李杨,王松,刘二平,等. 新型无固相甲酸盐完井液研制及性能评价[J]. 精细石油化工进展,2008,9(2):1-3.
- LI Yang, WANG Song, LIU Erping, et al. Preparation and performance evaluation of a new debris-free formate completion fluid [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2008,9 (2): 1-3.
- [18] 任闽燕,赵益忠,宋金波,等. 油井含砂在线监测技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2012,34 (1):141-146.
- REN Minyan, ZHAO Yizhong, SONG Jinbo, et al. Research on real-time sanding monitoring system for oil well [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012,34 (1): 141-146.
- [19] 陈光峰,卢中原,张兴华,等. 海上含硫气井地面测试流程安全控制技术[J]. 石油工程建设,2019,45 (3): 34-38.
- CHEN Guangfeng, LU Zhongyuan, ZHANG Xinghua, et al. Safety control technology of surface testing process for offshore sour gas wells [J]. Petroleum Engineering Construction, 2019,45 (3): 34-38.
- [20] 金泽亮,王革新,魏剑飞,等. 含硫油气井测试作业风险控制及推荐方法[J]. 油气井测试,2007,16 (3): 57-60.
- JIN Zeliang, WANG Gexin, WEI Jianfei, et al. Risk control for well testing operation in well containing H<sub>2</sub>S and its reference way [J]. Well Testing, 2007,16 (3): 57-60.
- [21] 高科超,尚锁贵,杨子,等. 海上油田复杂气井测试地面工艺的研究与创新应用[J]. 油气井测试,2017,26(2): 37-40.
- GAO Kechao, SHANG Suogui, YANG Zi, et al. Research and innovative application of the complex gas well testing ground process in offshore oilfield [J]. Well Testing, 2017,26 (2): 37-40.
- [22] 周涛,高科超,魏青涛,等. 渤海油田海上试油测试原油环保回收技术[J]. 油气井测试,2022,31(2):19-24.
- ZHOU Tao, GAO Kechao, WEI Qingtao, et al. Environmental recovery technology of crude oil from offshore oil test in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2022,31(2):19-24.
- [23] 吴会胜,晏琰,晏凌. 气井钻井液喷空后的压井方法研究[J]. 天然气技术与经济,2023,17(5):21-25.
- WU Huisheng, YAN Yan, YAN Ling. Killing ways in case of mud blowdown [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2023,17(5):21-25.
- [24] 党文辉,石建刚,孔祥伟,等. 平推压井法排量优化新模型及泵压分析[J]. 钻采工艺,2023,46(4):33-37.
- DANG Wenhui, SHI Jiangang, KONG Xiangwei, et al. A new optimization model of bullheading killing displacement and analysis of well kill curve [J]. Drilling and Production Technology, 2023,46(4):33-37.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**张金煌,男,1992 年出生,工程师,2014 年毕业于中国地质大学(北京)石油工程专业,现从事海上油田油气井测试施工管理及监督工作。电话:18522536323, Email:zhangjh75@cnoc.com.cn,通信地址:天津市滨海新区海川路 2121 号渤海石油管理局大厦 C 座 608 室,邮政编码:300452。