

# 柴达木盆地深井五阀一封地层测试工艺

王海兵<sup>1</sup>,王新强<sup>1</sup>,周胤男<sup>1</sup>,方利<sup>2</sup>,赵光亮<sup>1</sup>,安俊强<sup>1</sup>

1. 中国石油天然气集团有限公司青海油田分公司井下作业公司 青海茫崖 816400  
2. 中国石油管道局有限公司华北石油工程建设公司 河北任丘 062552

通讯作者:wanghbqhjx@petrochina.com.cn

引用:王海兵,王新强,周胤男,等. 柴达木盆地深井五阀一封地层测试工艺[J]. 油气井测试,2022,31(5):23-27.

Cite: Wang Haibing, Wang Xinqiang, Zhou Yinnan, et al. Formation testing technology with five valves and one packer for deep wells in Qaidam basin [J]. Well Testing, 2022, 31(5): 23-27.

**摘要** 柴达木盆地深井常采用尾管悬挂完井,井筒密闭性能不能满足 APR 地层测试需求,存在环空漏失严重、阀件开关异常的问题。立足现有测试工具和测试工艺技术,通过优化管柱结构、减少关井次数,利用 RD 压力测试阀、RDS 循环阀、RD 循环阀不同的操作压力,设计出满足一开一关井要求的五阀一封地层测试工艺。该工艺优选 RTTS 封隔器,优化各测试阀破裂盘开启压力级差,在井下工具失效时采用备用阀完成开关井动作,实现试油全过程压力数据记录,并顺利起出井内全部管柱。经 K4 井等多口井的应用,五阀一封地层测试工艺成功率达到 100%。该工艺为高温高压深井地层成功测试提供了借鉴。

**关键词** 高温高压井;五阀一封;地层测试;RD 压力测试阀;RDS 循环阀;RD 循环阀;RTTS 封隔器;操作压力

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2022. 05. 005

## Formation testing technology with five valves and one packer for deep wells in Qaidam basin

WANG Haibing<sup>1</sup>, WANG Xinqiang<sup>1</sup>, ZHOU Yinnan<sup>1</sup>, FANG Li<sup>2</sup>, ZHAO Guangliang<sup>1</sup>, AN Junqiang<sup>1</sup>

1. Downhole Operation Company of Qinghai Oilfield Company, CNPC, Qinghai, Mangya 816400, China  
2. China Petroleum Pipeline Bureau Co., Ltd. Huabei Petroleum Engineering Construction Company, Renqiu, Hebei 062552, China

**Abstract:** The deep wells in the Qaidam Basin are often completed with liner suspension, the wellbore sealing performance cannot meet the requirements of APR formation testing, and there are problems of serious annular leakage and abnormal valve switching. Based on the existing testing tools and technologies, by optimizing the structure of the pipe string, reducing the number of shut-ins, and using the different operating pressures of the RD pressure testing valve, RDS circulation valve, and RD circulation valve, a formation testing process with five valves and one packer was designed to meet the requirements of once well opening and shut-in. This process chooses RTTS packer, and optimizes the opening pressure difference of the rupture disk in each testing valve. When the downhole tool fails, the backup valve will take action to complete the well switching operation, to realize the pressure data recording of the whole process of oil testing, and to smoothly pull out all the pipe strings in the well. After the application of many wells such as Well K4, the success rate of the formation testing process with five valves and one packer has reached 100%. This process provides a reference for the successful testing of high-temperature and high-pressure formations in deep wells.

**Keywords:** HTHP well; five valves and one packer; formation testing; RD pressure testing valve; RDS circulation valve; RD circulation valve; RTTS packer; operating pressure

TCP+DST 联作是目前国内外较理想的完井测试方法之一。它可以在短时间内取得动态条件下地层和流体的多项物性参数,及时准确地认识评价新油藏,降低勘探、试油成本,科学指导增产措施,提高经济效益。在常规“高产、高含硫化氢”井亦可有效应用<sup>[1]</sup>。随着油田勘探开发深井的增多,试油气工艺对测试工具及密封性能的要求大幅提升、对地层数据录取要求更为苛刻。由于深井常采用尾管悬挂方式完井,井筒密闭性能差<sup>[2]</sup>,不能满足

APR 地层测试对环空压降值 10 min 内不得超过 1.38 MPa 的要求<sup>[3]</sup>;以“RTTS 封隔器+RDS 循环阀”为主要工具的两阀一封地层测试工艺不具备管柱掏空能力,地层测试原始压力数据中开井、射孔点压力变化不明显,资料解释困难<sup>[4]</sup>;以“RTTS 封隔器+RDS 循环阀+RD 压力测试阀”为主要工具的三阀一封、四阀一封地层测试工艺管柱结构简洁、工具简单,但在井下工具失效时无备用工具,易造成地层资料录取困难、甚至不能起出井内地层测试

工具;且 APR、RDS 两阀一封、三阀一封等地层测试工艺使用的工具及密封件其耐压 70.00 MPa、耐温 150 ℃已不能满足“高温、深井、高压井”安全测试及资料录取要求<sup>[5-6]</sup>。中国石油勘探开发研究院工程技术研究所基于 RDS 循环阀、Champ-V 封隔器设计的三阀一封测-射联作工艺,在明格布拉克圆满完成井深 5 914.0 m 高温、高压、高产、高含硫、高盐的 MX 井测-射联作<sup>[7]</sup>。中国石油西部钻探有限公司试油公司基于加强型 E 型差动阀、RDS 循环阀、RTTS 封隔器设计的四阀一封地层测试工艺,能满足压差 105 MPa、最高温度 204 ℃的地层测试要求,其在准噶尔盆地、库车山前等区块的高温高压井地层测试中取得圆满成功<sup>[8-10]</sup>,在柴达木盆地英中地区的高温高压高含硫井的应用中也取得较好效果<sup>[11]</sup>。庞振力等<sup>[12]</sup>针对高温高压井对测试工具和工艺的新要求,研制了高温高压井下测试工具,为高温高压井测试提供了重要技术支撑。纪松等<sup>[13]</sup>针对高温高压井射孔要求,通过对射孔器材、起爆装置、密封件以及仪器设备等进行精心设计,使其满足高温高压超深井射孔测试联作的施工要求。李玉明<sup>[14]</sup>针对油气勘探过程中,越来越多的井遇到不同浓度的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 气体,采用全套防硫测试流程和设备,加强安全措施,优化施工工艺,保证了测试成功。冉金成等<sup>[15]</sup>为解决超高压气井的试油测试难题,从试油准备工作、试油测试设计技术、测试工具的优化、安全保障措施、现场组织等方面总结分析了 L17 井的试油特点与难点,介绍了一些成功的经验和做法。赵启彬等<sup>[16]</sup>针对高温高压井测试作业需求,在“安全第一”的作业理念下,通过 RD 旁通阀和选择性测试阀的配合使用,使得现行工艺越来越完善。立足 APR、MFE、两阀一封、三阀一封地层测试工艺,借鉴国内外油田四阀一封等深井地层测试经验,形成一套稳定、高效、低成本的五阀一封地层测试工艺体系是试油气向深井发展的必然趋势,为支撑“高温、深井、高压井”的安全高效试油测试提供保障。

## 1 主要工具结构与原理

五阀一封地层测试工艺采用的主要工具为 RDS 循环阀和 RD 压力测试阀。

### 1.1 RDS 循环阀

RDS 循环阀是五阀一封地层测试的关井阀。RD 循环阀主要包括动力部分、球阀部分和循环部分<sup>[17]</sup>。

动力部分主要包括外筒、破裂盘、剪切芯轴等。当环空压力超过破裂盘破裂压力后,环空压力作用

在差动面上,推动剪切芯轴下行,剪断剪切销钉后继续下行并提供关闭动力,关闭球阀。

循环部分包括循环孔和换位芯轴。当芯轴位于上限位时,循环孔处于关闭状态;当芯轴下行至下限位时,循环孔处于打开状态。

### 1.2 RD 压力测试阀

RD 压力测试阀是五阀一封地层测试的开井阀。其结构与 RDS 循环阀类似,RD 压力测试阀与 RDS 循环阀的主要区别是:RD 压力测试阀无循环部分、入井时球阀处于关闭状态。RD 压力测试阀主要包括动力部分、球阀部分。

动力部分主要包括外筒、破裂盘、剪切芯轴等。当环空压力超过破裂盘破裂压力后,环空压力作用在差动面上,推动剪切芯轴下行,剪断剪切销钉后继续下行并为球阀提供开启动力。

球阀部分主要包括球阀总成、操作臂等。当芯轴剪断剪切销钉继续下行时,操作臂推动球阀转动至开启位置。

## 2 测试管柱结构与工艺原理

测试管柱结构由测试目的和要求决定,为了保证测试的顺利进行,在设计管柱结构时,应尽量使其结构简单、性能强大、适用广泛,以防因结构复杂导致在测试过程中出现管柱漏失等复杂问题<sup>[18-20]</sup>。

### 2.1 测试管柱结构

在进行常规测试时,五阀一封管柱结构(自下而上)为:油管+RTTS 封隔器+安全接头+液压循环阀+压力计托筒+RD 循环阀+RD 压力测试阀+RDS 循环阀+断销式反循环阀+油管至井口。

### 2.2 测-射联作管柱结构

当进行测-射联作时,五阀一封管柱结构(自下而上)主要有:射孔枪+压力起爆器+油管+下旁通+减震器+RTTS 封隔器+上旁通+安全接头+液压循环阀+压力计托筒+RD 循环阀+RD 压力测试阀+RDS 循环阀+断销式反阀+油管至井口。

### 2.3 压力设定

五阀一封地层测试管柱中 RD 循环阀、RD 压力测试阀、RDS 循环阀均采用环空加压打碎破裂盘的方式进行操作。

破裂盘压力设定公式为

$$P_D = P_H + P \quad (1)$$

式中, $P_D$  为破裂盘破裂压力,MPa; $P_H$  为破裂盘处静液柱压力,MPa; $P$  为操作压力,MPa。

为了打碎破裂盘,顺利完成操作,推荐 RD 压力

测试阀操作压力设定为 9.00~11.00 MPa, RDS 循环阀操作压力设定为 23.00~25.00 MPa, RD 循环阀操作压力设定为 30.00~32.00 MPa。

## 2.4 工艺原理

按五阀一封测试管柱连接测试工具,下测试管柱至测试层附近时,进行校深、坐封、安装采油树作业。环空打压至 RD 压力测试阀操作压力, RD 压力测试阀打开,地层测试一开井,继续打压至射孔压力点火射孔,射孔后泄压,测试管柱保持开井状态开井求产;求产结束后,环空打压至 RDS 循环阀操作压力, RDS 循环阀关闭,地层测试一关井;关井结束后,即可循环压井;若需挤注压井时可地面关井打压至 RD 阀操作压力,打开 RD 阀后进行挤注压井。

## 3 现场应用

2021 年,五阀一封地层测试技术在 K4 井、C904 井等 4 口井完成 7 井次现场应用,工艺成功率 100%。

### 3.1 K4 井五阀一封地层测试

K4 井是柴达木盆地 KT 构造的一口预探井。该井完钻井深 4 500.00 m,最大井斜 4.43°,采用  $\phi 139.70\text{ mm}\times 10.54\text{ mm}$  套管完井。2021 年 5 月 22 日~6 月 4 日,采用五阀一封地层测试工艺进行测试-射联作,其管柱结构(从上到下)为:油管挂+调整短节+外加厚油管+校深短节+外加厚油管+断销式反循环阀+RDS 循环阀+RD 压力测试阀+电子压力计托筒+RD 循环阀+液压循环阀+BW 安全接头+提升短节+上旁通+RTTS 封隔器+减震器+下旁通+外加厚油管+起爆器+安全枪+射孔枪+枪尾。

第 1 层组设计测-射联作井段 4 410.00~4 420.00 m,预测地层孔隙压力 69.66 MPa、温度 158.10 °C。设计一开井操作压力 12.45 MPa、一关井操作压力 26.29 MPa、挤注压井开启压力 33.09 MPa。设计加液垫 1 950.00 m、测试压差 51.04 MPa。

2021 年 5 月 24 日 02:31 环空打压至 12.00 MPa 地层测试一开井并射孔,一开流动期间泡泡头显示弱,抽汲排液未探得液面;5 月 25 日 13:50 环空打压至 25.00 MPa $\downarrow$ 0,地层测试一关井;6 月 4 日起出全部测-射联作管柱后发现封隔器胶筒破损且碳化严重,两只电子压力计均因温度过高烧毁,仅一只电子压力计能读出部分起钻前数据。其测得的压力历史曲线见图 1,温度历史曲线见图 2。

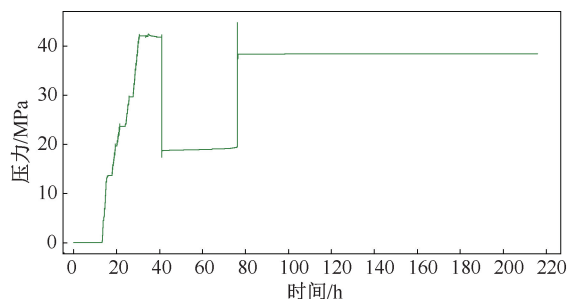


图 1 K4 井第 1 层组地层测试压力历史曲线

Fig. 1 K4-1 formation test pressure history curve

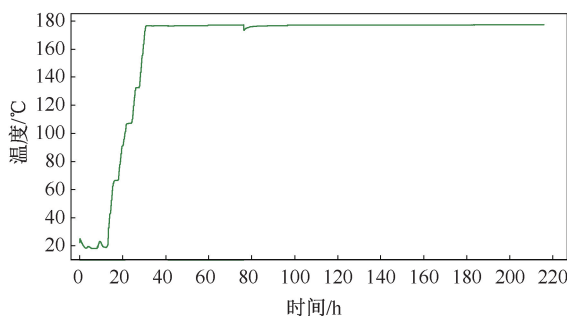


图 2 K4 井第 1 层组地层测试温度历史曲线

Fig. 2 K4-1 formation test temperature history curve

由图 1、图 2 可以看出:

(1)下钻、测井、一开井初期阶段静液柱压力基本平直,说明五阀一封测-射联作管柱在恶劣的井下环境初期能保持较好密封性,能顺利完成开井动作;

(2)RD 压力测试阀一开井动作压力波动明显,压力曲线辨识度高;

(3)一开井前期压力曲线平直,表明地层产能较低。但一开井后期压力曲线翘尾,表明封隔器胶筒在高温作用下碳化并出现渗漏,环空压井液缓慢流入油管,导致压力异常上升;

(4)在高温作用下封隔器胶筒碳化,一关井时压力经封隔器窜入油管,导致压力异常上升,而不呈压力恢复特征;

(5)胶筒破损压力和 RDS 循环阀一关井设计操作压力较为接近,影响地面判断。

### 3.2 C904 井五阀一封地层测试

C904 井是柴达木盆地 GCG 构造的一口评价井。该井完钻井深 3 820.00 m,最大井斜 3.26°,采用  $\phi 139.70\text{ mm}\times 10.54\text{ mm}$  套管完井。2021 年 7 月 4 日~10 日,采用五阀一封地层测试工艺在 C904 井进行测试-射联作。

第 1 层组设计测-射联作井段 3 486.0~3 498.0 m、3 516.0~3 524.0 m,预测地层压力 70.49 MPa、温度 110.69 °C。设计一开井操作压力 11.13 MPa、一关井操作压力 24.99 MPa、挤注压井开启压力 31.82

MPa。设计加液垫 1 639.71 m, 测试压差 54.99 MPa。

2021 年 7 月 4 日 18:12 环空打压至 16.00 MPa, 地层测试一开井并射孔, 一开流动期间泡泡头显示弱, 抽汲排液正常; 7 月 10 日 8:00 起出井内全部测-射联作管柱。其测得的压力历史曲线见图 3, 温度历史曲线见图 4。

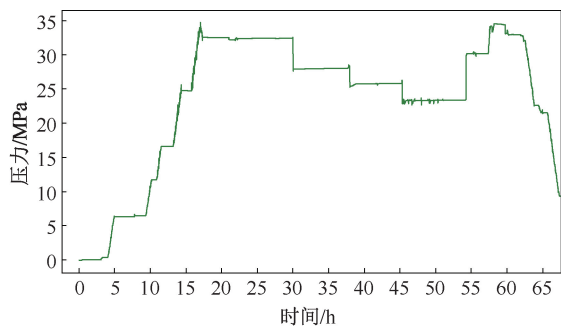


图 3 C904 井第 I 层组地层测试压力历史曲线

Fig. 3 C904-1 formation test pressure history curve

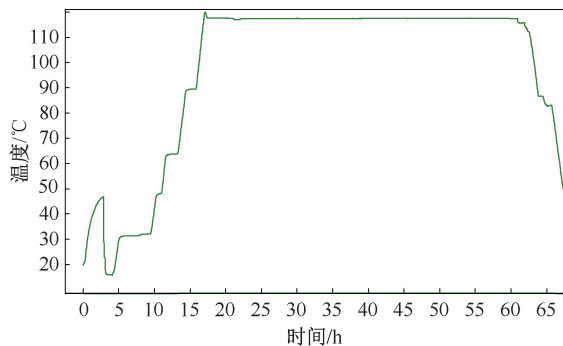


图 4 C904 井第 I 层组地层测试温度历史曲线

Fig. 4 C904-1 formation test temperature history curve

由图 3、图 4 可以看出: 本次作业下钻、测试、一开井、洗井、解封、起钻等阶段压力曲线动作点清晰, 压力波动明显, 曲线辨识度高, 测试取得圆满成功。

五阀一封地层测试工艺在 YS1 井、D6 井及 K4 井其他井段进行测试, 工艺成功率达 100%, 进一步验证了该工艺的整体性能可靠, 能满足深井地层测试要求。

## 4 结论

(1) 五阀一封地层测试井口安装采油树, 利用环空压力变化实现一次开关井, 且在打开循环或挤注通道时有备用阀, 有效降低了地层测试风险, 减小了劳动强度, 可较好地满足现场测试需求。

(2) 与 APR 地层测试管柱相比, 五阀一封地层测试工具具有结构简单、开关井可靠、对油套管密

封要求低、维护保养成本低的显著优点。

(3) 五阀一封地层测试在 K4 井遭遇异常高温, 但还是能顺利完成开井、射孔及一开井流动历史压力监测, 这说明五阀一封测-射联作工艺稳定性较好, 对深井地层测试施工具有良好的借鉴意义。

(4) 深井试油试气井温往往超过 180 °C, 易导致密封件失效、电子压力计损毁。建议逐步引进 210 °C 密封件和 210 °C 电子压力计, 以满足深井地层测试需求。

**致谢:** 感谢青海油田勘探事业部和井下作业公司对五阀一封地层测试工艺推广应用的大力支持; 感谢青海油田井下作业公司同意本文公开发表。

## 参考文献

- [1] 李加明, 黄天朋, 金强. 雅达瓦兰油田“四高”油气井完井测试工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(1): 25-31. LI Jiaming, HUANG Tianpeng, JIN Qiang. Completion test technology for “four-high” wells in Yadavaran Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 25-31.
- [2] 张益, 李相方, 李军刚, 等. 膨胀式尾管悬挂器在高压气井固井中的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 57-60. ZHANG Yi, LI Xiangfang, LI Jungang, et al. Application of expandable liner hanger in high pressure gas well cementing [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 57-60.
- [3] 李加明. MFE 和 APR 地层测试器应用技术研讨[J]. 油气井测试, 2010, 19(4): 33-35. LI Jiaming. Discussion on MFE and APR formation tester application technology [J]. Well Testing, 2010, 19(4): 33-35.
- [4] 李江, 赵有道, 王元龙, 等. “RDS 阀+RTTS 封隔器”测试工艺在试油作业中的应用[J]. 油气井测试, 2013, 22(4): 14-17. LI Jiang, ZHAO Youdao, WANG Yuanlong, et al. Application of RDS-RTTS test process in oil testing operation [J]. Well Testing, 22(4): 14-17.
- [5] 熊和贵, 高文祥, 刘洪涛, 等. 超深超高压高温气井测试管柱配置技术[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 52-53. XIONG Hegui, GAO Wenxiang, LIU Hongtao, et al. Configuration technology of well test string for deep ultrahigh pressure of high temperature gas well [J]. Well Testing, 2015, 24(5): 52-53.
- [6] 刘保连. “三高井”试油测试工艺探讨[J]. 油气井测试, 2011, 20(1): 43-45. LIU Baolian. Discussion on oil test for “Three High” well [J]. Well Testing, 2011, 20(1): 43-45.
- [7] 吴志均, 段德祥, 王文广, 等. 明格布拉克构造“五高”深井试油测试技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(2): 13-20. WU Zhijun, DUAN Dexiang, WANG Wenguang, et al. The oil test technology for “five high” deep well in Mingbulak



- structure [J]. Well Testing, 2020, 29(2): 13-20.
- [8] 刘洪涛, 黎丽丽, 吴军, 等. 库车山前高温高压气井测试管柱优化配置与应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 42-45.
- LIU Hongtao, LI Lili, WU Jun, et al. Optimized configuration and application of test string for high temperature and high pressure gas well in Kuqa County Piedmont [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 42-45.
- [9] 陈朝安, 郑辉, 李国亮, 等. 高温高压深井试油技术在准噶尔盆地的应用与分析[J]. 油气井测试, 2006, 15(1): 10-12.
- CHEN Chaoan, ZHENG Hui, LI Guoliang, et al. Application and analysis of high temperature and high pressure deep well testing technology in Dzungar basin [J]. Well Testing, 2006, 15(1): 10-12.
- [10] 张昌朝, 逯玉亮, 徐俊萍, 等. 超深井射孔测试联作技术在准噶尔盆地的应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(6): 16-18.
- ZHANG Changchao, LU Yuliang, XU Junping, et al. Application of ultra-deep well perforation test in Dzungar basin [J]. Well Testing, 2011, 20(6): 16-18.
- [11] 王福国, 袁贵德, 靳周, 等. 英中地区高温高压高含硫 SX58 井试油测试工艺技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(2): 7-12.
- WANG Fuguo, YUAN Guide, JIN Zhou, et al. Production test technology of Well SX58 with high temperature, high pressure and high sulfur content in Yingzhong area [J]. Well Testing, 2021, 30(2): 7-12.
- [12] 庞振力, 刘孝强, 季鹏, 等. 139.7 mm 套管高温高压测试封隔器研制[J]. 油气井测试, 2021, 30(6): 22-27.
- PANG Zhenli, LIU Xiaoqiang, JI Peng, et al. Development of high temperature and high pressure testing packer for casing with diameter of 139.7 mm [J]. Well Testing, 2021, 30(6): 22-27.
- [13] 纪松, 宫建. 高温高压井测试联作射孔技术研究及应用[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(3): 76-78.
- JI Song, GONG Jian. Research and application of perforating and testing combination technology in high emperature and high pressure well [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(3): 76-78.
- [14] 李玉明. 高含 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 井测试工艺技术应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 51-52.
- LI Yuming. Application of well test technology for well high content of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S [J]. Well Testing, 2018, 26(5): 51-52.
- [15] 冉金成, 骆进, 舒玉春, 等. 四川盆地 L17 超高压气井的试油测试工艺技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 58-60.
- RAN Jincheng, LUO Jin, SHU Yuchun, et al. Well testing technology for the gas well L17 with ultrahigh pressure in the Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(10): 58-60.
- [16] 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]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 32-34.
- [17] 李江涛. 地层测试开关井操作方法研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(2): 51-53.
- LI Jiangtao. Research on operation method of formation testing switch well [J]. Well Testing, 2008, 17(2): 51-53.
- [18] 窦益华, 许爱荣, 张福祥, 等. 高温高压深井试油完井问题综述[J]. 石油机械, 2008, 36(9): 140-142.
- DOU Yihua, XU Airon, ZHANG Fuxiang, et al. Sum-mary of well testing and completion problems in high temperature and high pressure deep wells [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9): 140-142.
- [19] 邱金平, 张明友, 才博, 等. 超深高温高压含硫化氢气藏高效试油技术新进展[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 49-50.
- QIU Jinping, ZHANG Mingyou, CAI Bo, et al. New development of high efficiency oil testing technology for ultra-deep high temperature and high pressure hydrogen sulfide bearing gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(2): 49-50.
- [20] 吴奇, 郑新权, 张绍礼, 等. 高温高压及高含硫井完整性设计准则[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 4.

编辑 方志慧

第一作者简介: 王海兵, 男, 1983 年出生, 工程师, 地球物理学学士, 2006 年 6 月毕业于成都理工大学地球物理学专业, 主要从事试油试气、地层测试工作。电话: 0937-8911187, 18997372891, Email: wanghbqhjx@petrochina.com.cn。通信地址: 青海省海西州茫崖市花土沟镇井下作业公司办公小区, 邮政编码: 816400。