

一种双向密封一次关井测试阀

刘述忍¹, 许亚东¹, 范俊强¹, 吴涛¹, 李江¹, 王逸霄²

1. 中国石油集团测井有限公司华北测试分公司 河北廊坊 065007

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司国际工程分公司 天津 300280

项目支持: 中国石油集团测井有限公司科技专项“深井超深井测试技术研究”(2023ZD01F-01); 中国石油集团油田技术服务有限公司科学研究与技术开发项目“万米深层超深层钻完井及测试配套工具研制与应用”(2024T-001-002)

引用: 刘述忍, 许亚东, 范俊强, 等. 一种双向密封一次关井测试阀[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 12-17.

Cite: LIU Shuren, XU Yadong, FAN Junqiang, et al. A bi-directional sealing one-time shut-in test valve[J]. Well Testing, 2026, 35(1): 12-17.

摘要 RDS 阀作为主测试阀使用时受井下压井液固相颗粒、施工过程中球阀上下交变压力及高压差等因素影响, 球座碟片受压导致测试阀密封不严, 测试曲线质量不合格。针对该问题研制了新型双向密封一次关井测试阀, 借鉴 MFE 测试阀滑套绕流开关井结构, 设计了由剪销、破裂盘操作、循环和关井机构组成的非全通径双向密封结构。通过材料优选和强度校核确定参数, 开展 232 °C、105 MPa 条件下的室内性能试验。强度计算表明, 测试阀抗内压屈服强度 146.3 MPa, 抗外压屈服强度 136.2 MPa, 满足 1.2 倍安全系数, 室内试验验证工具在 232 °C、105 MPa 条件下密封良好。现场应用 3 井层, 一次成功率 100%, 在 BT1 井 7 336.40 m 井深录取到了完整准确的井下温压数据。该测试阀避免了激动压力造成的提前开井和短暂泄压问题, 提高了开关井可靠性, 可在复杂井况下获取准确完整的储层测试资料, 具有较好应用前景。

关键词 一次关井测试阀; 双向密封; 测试射孔联作; 超深井; 交变压力; 压力恢复; 试井解释

中图分类号: TE927 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.002

A bi-directional sealing one-time shut-in test valve

LIU Shuren¹, XU Yadong¹, FAN Junqiang¹, WU Tao¹, LI Jiang¹, WANG Yixiao²

1. Huabei Well Testing Branch, China National Logging Corporation, Langfang, Hebei 065007, China

2. International Engineering Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd., Tianjin 300280, China

Abstract: When utilized as the primary test valve, the RDS valve often suffers from compromised sealing integrity and substandard test curve quality. These issues are primarily attributed to solid particles in downhole kill fluids, alternating pressures across the ball valve during operations, and high pressure differentials, all of which exert excessive stress on the ball seat discs. To address these challenges, a novel bi-directional sealing one-time shut-in test valve was developed. Drawing on the sliding sleeve bypass flow structure of MFE test valves, a non-full-bore bi-directional sealing configuration was designed, integrating shear pins, rupture disc operation, circulation, and shut-in mechanisms. Parameters were determined through material optimization and strength verification, followed by indoor performance evaluations conducted under conditions of 232°C and 105 MPa. It is revealed by strength calculations that the internal and external pressure yield strengths of the test valve reach 146.3 MPa and 136.2 MPa, respectively, satisfying a safety factor of 1.2. Laboratory results further confirm that the tool maintains robust sealing performance at 232°C and 105 MPa. During field applications across three wells, a 100% initial success rate was achieved; notably, accurate downhole temperature and pressure data were successfully acquired at a depth of 7,336.40 m in well BT1. The developed test valve effectively mitigates premature opening and transient pressure relief induced by surge pressures, thereby enhancing the reliability of shut-in operations. By enabling the acquisition of precise and integral reservoir test data under complex well conditions, this technology demonstrates significant potential for widespread application.

Keywords: one-time shut-in test valve; bi-directional sealing; combined testing-perforation operation; ultra-deep well; alternating pressure; pressure recovery; well test interpretation

目前, 根据中石油勘探开发向深层超深层进军的部署, 深井超深井钻探计划越来越多, 以 MFE 上提下放式和 LPR-N 阀环空打压式为主测试阀的管

柱组合难以应对这类井试油求产施工作业挑战^[1-2]。这类井测试管柱的设计原则就是能够实现“一开一关”工作制度取资料功能, 兼顾简单和测试

目的,测试工程师在测试阀选型及管柱组合上优化上不断创新,尤其是在塔里木油田等多个区域形成“两阀一封”、“三阀一封”、“四阀一封”和“五阀一封”四类超深超高压井试油管柱结构组合^[3-4],满足了塔里木、新疆、青海等深层超深层的测试求产。例如李江等^[5]报道了匹配5 000 m以浅井测试需求的“两阀一封”测试射孔联作工艺,刘述忍等^[6]报道了“三阀一封”管柱在华北油田冀中北部杨税务潜山深井测试应用,庞振力等^[7]将“四阀一封”测试工艺应用到中生界储层超深井坐套测裸中途测试中,伍强等^[8]将“四阀一封”完井测试一体化管柱在四川盆地6 000 m以深的高压含硫气井中成功应用。以上工艺都是采用RD安全循环阀作为测试主阀使用,球阀可以实现一次井下关井,而循环孔打开后可用于循环压井。Halliburton公司为增强其抗压强度,对工具材料和机构升级改造,将压差外筒和芯轴的材料换成718不锈钢,它是一种镍基合金材质,承压数值提高了62 MPa,最大抗内压193 MPa^[9-10]。而工具球阀关闭后下部承压能力取决于球阀,我国自主生产承压35 MPa,国外产品承压70 MPa,业内称之为加强型RD安全循环阀,深井超深井多采用国外产品,施工成本大幅度增加。陈光智等^[11]针对双探1井高温、高压、高产特征及相关技术难点的实际情况出发,采用两只同样级别破裂盘的RD安全循环阀,保证井下关井动作实施的成功率,但该报道未见测试温度压力实测曲线。但是毛军^[12]分析认为RD安全循环阀执行井下关井时,当球阀关井完毕,由于高压流体流出导致的压力恢复导致球阀下部和上部压力差瞬间升高,挤压球阀上部的碟簧部件,导致球轻微泄露,球阀上下瞬时短暂连通;当球阀上端压力升高导致球阀下部和上部压力差减少时,球阀重新关闭,持续进行压恢测试,在电子压力计回放曲线上会出现压力短暂下掉或者水平然后再上升的情况,测试资料品质下降影响试井解释评价。贾海等^[13]在研究RGD效应降低橡胶密封元件的密封性能时,在LS1井井下压力温度曲线图上

的第2、4、6次关井压力恢复曲线上具有明显的泄压情况。毛军设计了球阀的辅助活塞液压补压结构,采用连接接头将活塞锁死阻止活塞上窜,研制了全新的可作为测试主阀使用的一次关井测试阀。该工具进行室内高压性能测试,球阀采用自主产品,实现了井下工作条件204℃和105 MPa,球阀关闭后下部承压提升到105 MPa,该工具未见现场试验记录。

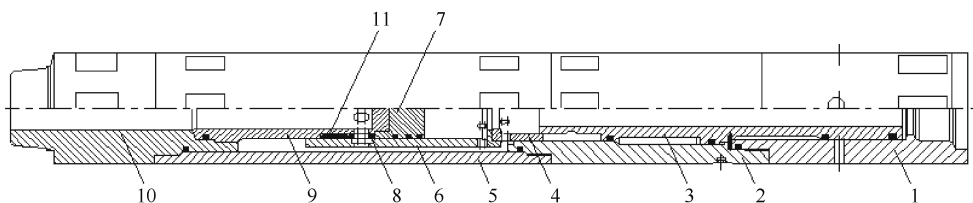
为增强测试阀对复杂工况影响的耐受度,采集准确高品质的井下压力恢复数据,本文从结构组成和工作原理两方面,借鉴经典测试阀MFE(multi flow evaluator)的滑套绕流开关井结构^[14-15],研制了一种非全通径的双向密封一次关井测试阀,并进行了强度计算和高温性能试验,举例说明了该测试阀可以在高压井、深井等复杂井况下进行测试射孔联作施工,在深井超深井试油测试中具有较大普及潜力。

1 结构原理

测试阀受井下压井液固相颗粒、施工过程中球阀上下交变压力及高压差等因素影响时,球座与球笼之间的密封圈极易发生刺漏,损坏球阀,造成测试阀密封不严,导致测试曲线不合格。因此,需要对球阀结构进行改进,借鉴滑套和MFE测试阀开关井结构,设计了一种非全通径的双向密封的一次关井测试阀。

1.1 结构组成

非全通径的双向密封的一次关井测试阀由剪销部分、破裂盘操作部分、循环部分和关井机构组成(见图1)。剪销部分主要作用是固定心轴,保证在下井时固定剪切心轴,使循环孔处于关闭状态、及关井机构处于打开状态。破裂盘操作部分主要作用是设置此工具的操作压力,及为此工具动作提供动力。循环部分主要作用是在操作此工具后,循环孔打开,此时管柱内外沟通,可进行循环作业。关井机构主要作用是进行关井作业,并保证在循环作业时循环液不进入地层。



1-上接头;2-破裂盘外筒;3-剪切心轴;4-弹爪;5-外筒;6-密封套筒;7-密封短节;8-挡圈;9-过滤短节;10-下接头;11-密封组件。

图1 一种双向密封一次关井测试阀结构图

Fig. 1 Structural drawing of one-time shut-in test valve

1.2 工作原理

双向密封一次关井测试阀在未操作时,循环外筒上均布4处循环孔,此时处于关闭状态,关井机构处于打开状态,过滤短节与密封套筒连通,此时可进行其他测试作业,生产过程中地层高压流体从此通道进入密封套筒与外筒的环形空间,再从密封套筒上端的流通孔进入油管内部;当需要进行关井作业时,环空加压打破此阀其上安装的破裂盘,压力通过破裂盘孔进入此阀空气室,剪断剪销后推动剪切心轴向下运动,剪切心轴带动密封套筒下行,隔断过滤短节与密封套筒连通通道,形成与地层连通的密闭空间,关闭关井机构;在关井过程中,由于剪切心轴其上密封循环孔的行程设计有预留距离,使循环孔始终处于关闭状态;关井后,剪切心轴继续向下运动打开循环孔与测试阀上部油管相通,至此此阀动作完成,可进行循环作业。

双向密封一次关井测试阀是一次性作业工具,井下操作后,循环孔将始终处于打开状态、关井机构始终处于关井状态,直至工具进行下次保养维护后。

2 工具强度计算

双向密封一次关井测试阀设计额定指标满足施工储层温度为232℃,储层压力为105 MPa,需要对测试阀各部件的材质进行优化升级,同时校核关键部件的薄弱点的抗内压、抗外压、抗拉伸和抗扭曲强度。

2.1 工具材料优选

试油测试作业用井下工具常用的金属材料为30CrMo、35CrMo、42CrMo等以Cr-Mo为基础的中、低碳合金钢,比如行业中普遍使用的美国哈里伯顿公司生产的APR系列测试工具,其金属材料主要是42CrMo,哈里伯顿APR工具使用手册中规定在80℃以上的温度其可以在酸性环境中工作^[16]。川渝地区高温高压含硫气井使用的井下工具主要是国外厂家生产,材质主要采用高强度、高抗腐蚀的镍基合金钢Inconel 718,其镍含量为50%~55%,屈服强度为1 034 MPa,弹性模量为207 GPa,抗拉强度1 275 MPa。

2.2 强度校核

该测试阀的外筒、心轴、密封外筒和密封心轴均为管件。抗外压强度校核公式^[17]为

$$P_1 = n_1 \sigma_s \left(\frac{2.503}{D/\delta} - 0.046 \right) \quad (D/\delta < 14) \quad (1)$$

$$P_1 = 2n_1 \sigma_s \frac{D/\delta - 1}{(D/\delta)^2} \quad (D/\delta > 14) \quad (2)$$

式中: D 为工具外筒直径,mm; n_1 为安全系数,一般取值为1.25; σ 为工具外筒的壁厚,mm; σ_s 为材料的屈服强度,MPa; P_1 为管柱抗挤毁的外压力,MPa。 P_1 大于管柱承受最大外压力 P_w 时,管柱安全。

管件抗内压强度的压力可按第四强度理论计算

$$P_2 = \frac{(D^2 - d^2)\sigma_s}{n_2 \sqrt{d^4 + 3D^4}} \quad (3)$$

对于薄壁管柱($D/\delta < 14$),也可以按照以下公式计算

$$P_2 = \frac{2n_b \delta \sigma_s}{D} \quad (4)$$

对于厚壁管柱($D/\delta > 14$),也可按第三强度理论计算

$$P_2 = \frac{(D^2 - d^2)\sigma_s}{2n_2 D^2} \quad (5)$$

式中: d 为管柱内径,mm; n_2 为安全系数,一般取值为1.25; P_2 为管柱抗内压强度的内压力,MPa。 P_2 大于管柱承受最大内压力 P_N 时,管柱安全。

所有零部件在受轴向力拉伸时,抗拉强度的应力计算

$$F_1 = \sigma_s A / (n_3 \times 10^3) \quad (6)$$

式中: F_1 为许用抗拉强度,kN; n_3 为安全系数; A 为部件截面积,mm²。

抗扭强度计算

$$M_n = 0.2 \times D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \times \sigma_s \times \{0.5 \sim 0.6\} \quad (7)$$

式中: M_n 为抗扭强度,kN·m。

应用以上公式校核设计测试阀的各部件薄弱点,结果见表1和表2。从表1可以看出,该测试阀的抗内压和抗外压薄弱处在外筒中段内孔处,抗内压屈服强度为146.3 MPa,抗外压屈服强度为136.2 MPa,均满足大于105 MPa工作压力的1.2倍的安全系数。从表2可以看出,该测试阀的抗拉薄弱处在零件外筒两端T85.73 mm-6SA内螺纹退刀槽,抗拉屈服强度为1 601.3 kN,满足要求1 300 kN的1.2倍安全系数;抗扭薄弱处在零件下接头右端73.03 mm CAS外密封槽处,扭屈服强度为22.7 kN·m,满足要求15 kN的1.2倍安全系数。

表 1 各部件抗外压强度和抗内压强度计算结果表
Table 1 Calculation results of external pressure strength and internal pressure strength of each component

序号	零件名称	部位	抗外压强度 /MPa	抗内压强度 /MPa	备注
1	上接头	73.03 mm CAS 止口处	176.1	192.5	
		右端外密封面	208.1	230.2	
		右端外密封槽底	147.9	159.7	
2	心轴	两端外密封面	266.5	300.5	
		两端外密封槽	201.1	222.0	
		中段端外密封槽		280.2	空气室抗内压强度
3	破裂盘外筒	左端内密封面	164.4	178.8	
		中端内密封面	260.0		空气室抗外压强度
		右端外密封面	224.8	250.2	
		右端外密封槽	170.9	186.3	
4	外筒	中段内孔	136.2	146.3	抗压强度薄弱处
5	下接头	左端内密封面	170.9	186.3	
		73.03 mm CAS 外密封槽	313.4	357.5	
6	密封套筒	中段内密封面	136.7	146.9	
7	密封心轴	左端外密封面	191.8	210.9	

表 2 各部件抗拉强度和抗扭强度计算结果表
Table 2 Calculation results of tensile strength and torsional strength of each component

序号	零件名称	部位	抗拉强度 /kN	抗扭强度 /kN·m
1	上接头	右端 T85.73 mm-6SA 外螺纹退刀槽	2 349.2	36.3
2	破裂盘外筒	左端 T85.73 mm-6SA 内螺纹退刀槽	1 779.3	39.8
		右端 T85.73 mm-6SA 外螺纹退刀槽	2 574.4	39.8
3	外筒	两端 T85.73 mm-6SA 内螺纹退刀槽	1 601.3	36.4
4	下接头	右端 73.03 mm CAS 外密封槽处	1 962.1	22.7

3 室内性能试验

为保证测试阀各项指标达到设计要求,开展了工具的常温破裂盘孔压力密封试验、破裂盘孔上下两道密封圈密封试验、内压试验和高温内压试验、高温关井功能试验和关井后高温工具下端密封试验,试验后拆开工具检查各部件完整性。

(1) 破裂盘孔压力密封试验

安装模拟破裂盘和 99 mm 面包圈试压装置,连接试压管线、传感器和试压泵,封堵排气孔,逐级增压至 105 MPa 后,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无渗漏现象。

(2) 破裂盘孔上下两道密封圈密封试验

破裂盘下端安装 99 mm RD 循环阀试压短节,剪切心轴最下端一组密封圈不安装;破裂盘外筒其上安装 99 mm 面包圈试压装置,连接试压管线、传感器和试压泵;逐级增压至 105 MPa 后,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无渗漏现象。

(3) 内压试验

卸下端试压短节,卸下破裂盘外筒,将密封组件装到密封心轴上,密封心轴上端拧上过流短节,并拧紧,将上端密封套筒以上组装再一起,将密封心轴与下接头组装在一起;两端拧上试验接头,连接试压管线、传感器和试压泵,工具内部注 20#硅油,封堵排气孔,逐级增压至 105 MPa 后,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无渗漏现象。

(4) 高温关井功能试验

泄压,拆下常温试压管线;连接高温试压管线,分别连接工具一端试压接头、99 mm 面包圈试压装置;注油排净内腔空气,保持 2 处加压孔敞开;封堵排气孔,升温 232 ℃,逐级增压至 105 MPa 后,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无渗漏现象。

(5) 高温剪切试验

将工具内压降至 35 MPa,从破裂盘孔逐级加压至 4 支剪销剪断,记录剪销剪断时的压力值;继续增压至 105 MPa,使循环孔完全打开,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无压降、渗漏情况;卸掉压力,从下端试压接头处逐级增压至 105 MPa 后,封闭内腔压力,保持 15 min,检查有无渗漏现象。

图 2 给出了 232 ℃/105 MPa 条件下的内密封试验曲线和测试阀关闭后下端密封性能试验曲线,从图中可以看出,压力曲线上没有出现漏失,密封性能良好。该试验结果显示测试阀可以承受 232 ℃ 高温,同时测试阀关闭后下部承压 105 MPa。

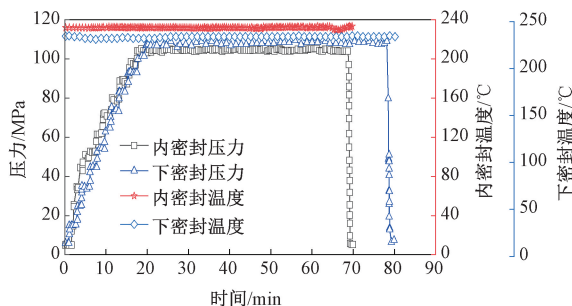


图 2 232 ℃/105 MPa 内密封和下端密封试验曲线
Fig. 2 Sealing test curves of inner part and lower part under 232 ℃/105 MPa

4 现场应用

2025年,采用双向密封一次关井测试阀实施的测试射孔联作技术在巴彦油田超深井共计应用3井次,一次成功率100%。双向密封一次关井测试阀能够保持稳定的工作状态,具有下钻过程中没有误开井、测试过程中关井稳定的特点,采集的储层温度压力数据齐全准确。以BT1井为例说明现场使用效果。

BT1井是部署在河套盆地临河坳陷巴彦淖尔凹陷扎格构造内带ZG2X北圈闭上的一口风险探井,完钻井深7418.00m,测试时井深7336.40m,完钻后油层套管为 $\Phi 177.8$ mm,下入深度12.52~4995.84m,139.7mm尾管回接4993.76~7364.50m。测试目的是求取储层液性、产能、压力及相关地层参数。测试层位 $E_3I_{II_2}$,电测解释107#、113#、116#层,测试井段6521.00~6561.90m,3层厚9.2m,采用射孔测试工艺以及系统试井,根据邻井ZG2X井 E_3I_3 层的测试结论预测BT1井压力系数为1.05。

2025年4月25日至6月4日,该井使用双向密封一次关井测试阀作为测试阀,进行了测试射孔联作工艺施工,采用二开二关工作制度,其中一关采用地面井口关井,二开期间依次采用3、4、5、6、3mm油嘴放喷进行系统试井,MR封隔器坐封在6457.49m,压井液为氯化钾溶液,密度为 1.16 g/cm^3 ,测试管柱中加清水液垫4401.32m,容积 13.26 m^3 。测试管柱组成为(从上到下):油管+变扣+油管+校深短节+油管+加强型RD循环阀+油管+电压拖筒+双向密封一次关井测试阀+油管+电压托筒+液压旁通+RTTS安全接头+传压接头+MR封隔器+扶正器+减震器+筛管密封接头+油管+点火头+射孔枪。

图3表示的是BT1井测试时间-压力、温度历史展开图。电子压力计回放出的数据真实地记录了井底压力的动态变化,获得了清晰、完整的压力曲线,其形态反映出,封隔器密封良好,测试开井、关井操作准确无误,测试工艺成功。在5月27日11:19环空打压30MPa关闭双向密封一次关井测试阀,实现二次关井(井下关井),电子压力计测点垂深6269.13m,测试阀位置垂深6259.81m,二次关井压力恢复期间,当实测压力恢复到测试阀关闭后的静液柱压力62.59MPa以上时未出现泄压现象,说明该测试阀实现了双向密封功能。经对二次关井压力恢复数据进行试井分析,获得的压差与压差导数双对数-导数曲线,经过早期井储阶段之后,

进入明显的径向流阶段,导数后期出现“上翘”的边界响应特征^[18],根据曲线特征采用井储+表皮+均质+断层模型进行拟合分析,获得地层油相有效渗透率 $7.90 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,地层系数 $72.68 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,表皮系数-0.06,断层距离122.59m和206.86m。

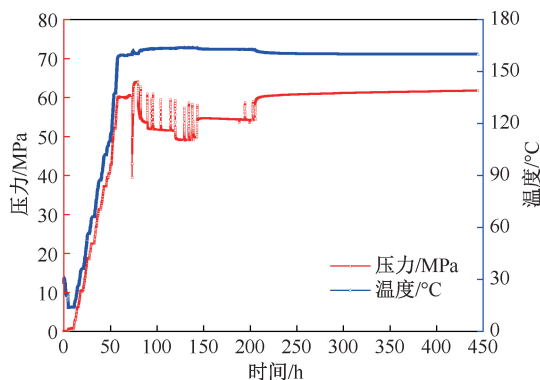


图3 BT1井测试时间-压力、温度历史展开图
Fig. 3 Diagram of pressure and temperature with time for well BT1

5 结论

(1)双向密封一次关井测试阀采用剪销机构和计量套设计,有效避免了下钻过程中环空激动压力造成的提前开井问题,机械锁定机构保证了开关井动作的可靠性,适用于深井、大斜度井和高压井等复杂井况。

(2)通过选用镍基合金材料和优化结构设计,测试阀承压能力显著提升,强度校核和室内高温高压试验验证了该工具可在 $232\text{ }^\circ\text{C}/105\text{ MPa}$ 条件下稳定工作,满足超深超高压高温气井的测试要求。

(3)现场应用表明,双向密封一次关井测试阀与测试射孔联作工艺配合良好,一次成功率达100%,能够获取清晰完整的压力恢复曲线,为储层评价和产能分析提供了可靠的资料依据。

致谢:感谢宝鸡市元亨石油设备有限责任公司提供高温高压试验场所,感谢中国石油集团测井有限公司华北测试分公司现场施工队伍提供的试验支持和地质研究人员的试井解释与评价。

参考文献

- [1] 徐进. 元坝气田超深酸性气藏石油工程技术实践与展望[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 1-10.
XU Jin. Practices and prospect of petroleum engineering technologies in ultra-deep sour gas reservoirs, Yuanba gas field, Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 1-10.
- [2] 刘俊霞. 深层气井试气工艺设计研究[D]. 青岛: 中国

- 石油大学, 2008:35-38.
- LIU Junxia. The study on test project design technology for deep gas well [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008:35-38.
- [3] 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.
- [4] 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(5): 42-45.
- LIU Hongtao, LI Lili, WU Jun, et al. Optimum configuration and application of well testing string for ultra-deep HTHP gas wells in Kuqa, Tarim [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5): 42-45.
- [5] 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): 56-57.
- LI Jiang, ZHAO Youdao, WANG Yuanlong, et al. Application of “RDS valve + RTTS packer” test technology in oil test operation[J]. Well Testing, 2013, 22(4): 56-57.
- [6] 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.
- [7] 庞振力, 彭勇, 黄忠辉, 等. KT1 井四阀一封裸眼地层测试技术[J]. 油气井测试, 2023, 32(2): 19-23.
- PANG Zhenli, PENG Yong, HUANG Zhonghui, et al. Four-valve one-packer open-hole testing technology for well KT1[J]. Well Testing, 2023, 32(2): 19-23.
- [8] 伍强, 陈波, 刘生国. 四川盆地超深高压含硫气井测试管柱设计方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 17-21.
- WU Qiang, CHEN Bo, LIU Shengguo. A design method of test string for ultra-deep and high-pressure sour gas well in Sichuan basin[J]. Well Testing, 2022, 31(1): 17-21.
- [9] 庞振力, 宋国强, 季鹏, 等. 高温高压试油测试工具、工艺技术及其现状分析[J]. 当代化工研究, 2021(15): 133-134.
- PANG Zhenli, SONG Guoqiang, JI Peng, et al. Test tools, technology and current situation analysis of high temperature and high pressure oil testing [J]. Modern Chemical Research, 2021(15): 133-134.
- [10] 罗利民. 超高压高温井地层测试管柱结构优化探讨[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(4): 36-37.
- LUO Limin. On structural improvement of formation test string in high-pressure and high-temperature wells [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(4): 36-37.
- [11] 陈光智, 贺秋云, 赵益秋. 高温高压高产气井测试技术在双探 1 井的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 31-33.
- CHEN Guangzhi, HE Qiuyun, ZHAO Yiqiu. Application of HTHP and high production test technology in Shuangtan well 1[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 31-33.
- [12] 毛军. 一种新型一次关井测试阀的研制[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 13-18.
- MAO Jun. Development of a novel one-time shut-in test valve[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 13-18.
- [13] 贾海, 王东林, 潘登, 等. 天然气井试油完井过程中快速泄压对井下工具密封性的影响[J]. 钻采工艺, 2022, 45(6): 59-64.
- JIA Hai, WANG Donglin, PAN Deng, et al. The influence of rapid pressure relief on sealing property of downhole tools in the process of well testing and completion in natural gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(6): 59-64.
- [14] MCALISTER J A, NUTTER B P, LEBOURG M. A new system of tools for better control and interpretation of drill-stem tests[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17(2): 207-214.
- [15] 胡浩华, 白学东, 程战民. 大斜度井 MFE 测试工艺探讨[J]. 油气井测试, 2004, 13(3): 38-39.
- HU Haohua, BAI Xuedong, CHENG Zhanmin. Discuss for MFE testing technology with big declination[J]. Well Testing, 2004, 13(3): 38-39.
- [16] 贺秋云, 廖刚, 宋军正. 试油测试作业 H₂S 腐蚀破坏的防护工艺[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 64-67.
- HE Qiuyun, LIAO Gang, SONG Junzheng. Preventive measures against the H₂S corrosion in oil/gas well testing [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 64-67.
- [17] 朱晓荣. 封隔器设计基础[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 48-49.
- [18] DANIEL E, ADEWOLE S. Type curves of a vertical well completed within a pair of inclined sealing faults [R]. SPE 211904, 2022.

编辑 方志慧

第一作者简介: 刘述忍, 男, 1984 年出生, 高级工程师, 博士研究生, 2013 年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业, 现从事油气井测试技术研究与管理工。电话: 18533641086, Email: liushuren@cnpc.com.cn。通信地址: 河北省廊坊市广阳区万庄石油矿区华北测试公司, 邮政编码: 065007。