

# 高温高压测试封隔器的改进

程莹<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 汪坤<sup>2</sup>

- 1. 西安石油大学机械工程学院 陕西西安 710000
- 2. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院 新疆库尔勒 841000

通讯作者: Email: 1040433645@ qq. com

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“超深高温高压气井井完整性及储层改造技术研究与应用”(2018E-1809)

引用: 程莹, 张伟, 汪坤. 高温高压测试封隔器的改进[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 11-16.

Cite: CHENG Ying, ZHANG Wei, WANG Kun. Improvement of high temperature and high pressure testing packer [J]. Well Testing, 2022, 31(6): 11-16.

**摘要** 塔里木库车山前油气层勘探逐渐迈向超深层, 地层压力、温度指标不断升高, 井况工况逐渐苛刻, 测试工具和工艺不配套矛盾日渐突出, 封隔器性能不足问题凸显。针对库车山前 127 mm 和 193.7 mm RTTS 封隔器耐温耐压不足的问题, 通过对封隔器芯轴、胶筒、水力锚、密封件等关键结构改进及材质优选升级, 提升了封隔器耐温耐压、抗拉强度、防上窜等能力, 工具整体性能达到 210 ℃/105 MPa, 满足高温高压井测试封隔器的应用需求。改进后的 127 mm 和 193.7 mm RTTS 封隔器均通过内压性能测试、胶筒高温承压及水力锚动密封承压等室内测试, 并在博孜 2、克深 8~17 井复杂井况工况条件下试验成功。改进后的测试封隔器满足库车山前超深高温高压气井的安全试油作业, 可为同类工具的改进提供重要参考依据。

**关键词** 库车山前; 高温高压; 测试封隔器; 结构改进; 材质升级; 现场应用

中图分类号: TE373 文献标识码: B DOI: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2022. 06. 003

## Improvement of high temperature and high pressure testing packer

CHENG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, WANG Kun<sup>2</sup>

- 1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710000, China
- 2. Oil & Gas Project Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

**Abstract:** In recent years, the exploration of oil and gas moving into the ultra-deep layer which pressure and temperature indicators have increasing and the well conditions gradually harsher. Causing the contradiction between testing tools and technology becoming increasingly salient, and the insufficient performance of the packer being prominent. Therefore, in order to solve the problem of insufficient temperature and pressure resistance of 127 mm and 193.7 mm RTTS packers in Kuqa, key structural improvements and material upgrades of packer mandrel, rubber, hydraulic anchor and seal structure are carried out to improve the packer's temperature and pressure resistance, tensile strength and anti-upscaling capabilities. The overall performance of the tool reached 210 ℃/105 MPa, which can be used in the HTHT oilfield. The two improved packers have passed the internal pressure performance test, rubber cylinder high temperature pressure test and hydraulic anchor seal pressure test. Otherwise, improved packers have successfully tested in BZ 2 and Kes 8~17 under complex well conditions. The field application shows that the improved test packer can meet the safety test operation of ultra-deep HPHT gas well in Kuqa, and provides an important reference for the improvement of similar tools.

**Keywords:** Kuqa; HTHP; testing packer; packer improvement; material upgrade; field application

APR 地层测试技术是塔里木库车山前油气层评价的重要手段, 其测试管柱主要由封隔器、测试阀、井下压力计等关键工具构成, 可在不动管柱的情况下通过环空加压实现井下开井、关井、循环等各项操作, 达到获取地层资料和产能的目的<sup>[1-5]</sup>。封隔器作为测试管柱的重要组成部分, 其性能参数、指标是保障安全测试的关键<sup>[6-7]</sup>。随着近年来

塔里木油气勘探逐渐迈向超深层, 钻井深度超过 7 000 m、地层压力大于 120 MPa、温度大于 177 ℃, 施工井况工况异常复杂, 对压井液、工具及配套密封件的要求更高, 测试工具和工艺不配套问题日渐凸显, 现用 177 ℃/70 MPa 测试封隔器面临着巨大挑战<sup>[8]</sup>。例如, 角探 1 井在酸化施工过程中多次高挤震荡解堵, 在进行第 8 次高挤震荡时, 193.7 mm 测试

封隔器发生窜漏。经分析论证,窜漏原因是由于多次震荡酸化使封隔器胶筒疲劳、承受压差降低导致。因此,亟需开展测试封隔器改进升级,满足库车山前超深超高温高压勘探开发需求,提高测试一次成功率。

徐刚<sup>[9]</sup>为了解决海上油田老式隔离封隔器易刮损失效和密封性能差的问题,采用具有不同硬度组合的三胶筒式密封结构,研制了一种适用于防砂作业的新型隔离封隔器,并在渤海、南海等油田成功推广应用超过 30 井次。闫志远<sup>[10]</sup>等人针对封隔器胶筒存在耐温、耐压和循环测试可靠性不足的技术难题,通过开展三胶筒组合结构优化、胶筒材料优选、胶筒关键尺寸理论计算等工作,研制了符合 API 11D1~V3 级别的耐温 170 ℃、耐压 41 MPa 的组合式胶筒,并完成现场试验。庞振力<sup>[11]</sup>针对现有 139.7 mm 套管使用的耐温 177 ℃、耐压 70 MPa RTTS 封隔器已不能满足超深井安全测试的问题,研制了耐温 204 ℃、耐压 105 MPa 自带同心旁通机构、自锁机构、三胶筒结构、机械坐封、可双向封隔压力的可回收悬挂式测试封隔器,并通过 API 11D1~V3 级别室内试验;高攀<sup>[12]</sup>针对塔里木油田高温高压复杂地层,通过优化卡瓦锚定结构和位置,研发了最高耐压达 105 MPa、耐温达 204 ℃、可在高比重钻井液中使用的双向卡瓦液压坐封可回收封隔器。韩永亮<sup>[13]</sup>针对常规 K344 封隔器存在承压性能低、施工规模受限、无法顺利解封等问题,通过采用辅助承压/解封机构和胶筒一体化中心管的结构形式,并在易变形部位采用可溶包覆层补位,成功研制出 K344 型可溶辅助解封压裂封隔器,提高了工具的解封可靠性。王志坚<sup>[14]</sup>等人针对封隔器卡瓦承受巨

大压力时易发生断裂问题,对卡瓦进行结构设计,在有限元数值模拟分析的基础上得出卡瓦牙间距为 30 mm 时,卡瓦应力、应变分布越均匀,承受载荷最高。陈勇<sup>[15]</sup>等人针对气体钻井条件,创新研发了大推力双液缸坐封关键结构,进而研制了气体驱动坐封的封隔器。Chen Yong<sup>[16]</sup>等人针对超深井封隔器橡胶填料元件耐温压指标不足的问题,开展橡胶材料配方研究,在有限元结构分析和室内实验的基础上,设计出一种耐温 215 ℃、耐压 105 MPa 橡胶填料元件。

本文针对库车山前 127 mm 和 193.7 mm RTTS 封隔器耐温耐压不足的问题,通过对封隔器的芯轴、胶筒、水力锚、密封件等关键结构改进及材质升级,使得封隔器耐温由 177 ℃ 上升至 204 ℃,耐压由 70 MPa 上升至 105 MPa,封隔器整体耐温、耐压、抗拉强度、防上窜能力均得到显著提升,解决了库车山前高温高压井现用测试封隔器性能参数不足的问题。

## 1 结构及参数

改进后的高温高压测试封隔器结构与原理与 RTTS 封隔器基本相同,但技术参数得到明显提升。

### 1.1 结构组成

改进后的高温高压测试封隔器主要由机械卡瓦、摩擦块、水力锚、胶筒四部分组成,封隔器关键结构如图 1 所示。密封部分由端部胶筒、中间胶筒、胶筒芯轴等部件组成;机械卡瓦部分由卡瓦锥体、卡瓦体、卡瓦座组成;水力锚部分由锚爪和锚体组成,可以防止封隔器下部压力过大时推压封隔器使工具上窜。

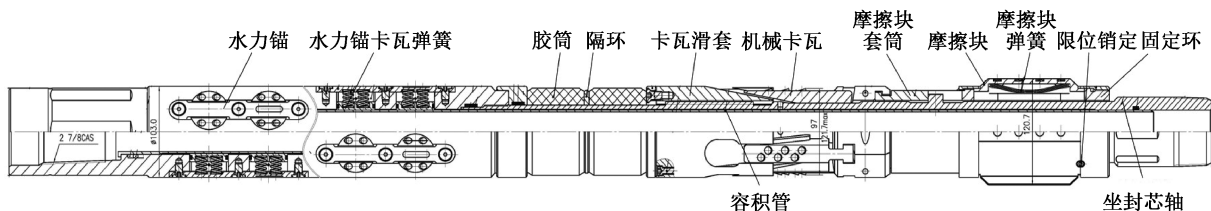


图 1 高温高压测试封隔器结构示意图 (127 mm 测试封隔器)

Fig. 1 Structural diagram of the test packer under HTHP

### 1.2 工作原理

封隔器坐封过程中,先上提管柱至一定高度,正转管柱 10~15 圈,使其外中心管上的锁销进入换向机构“J”型槽的长槽,然后下放管柱,依靠扶正体与套管产生的摩擦力使卡瓦伸出,固定在套管上,继续下放管柱压缩胶筒,实现封隔器坐封。在油

管、套管压力平衡后,通过上提管柱,位于外中心管的锁销自动滑入“J”型槽锁定位置,实现解封。

### 1.3 技术参数

对 127 mm 和 193.7 mm 测试封隔器进行结构改进和材质升级,改进后的封隔器耐温耐压性能达到 210 ℃/105 MPa,其技术参数见表 1。

表 1 测试封隔器改进前后参数对比

Table 1 Parameter comparison of test packer before and after improvement

封隔器 尺寸/mm	改进 部位	芯轴		胶筒			水力锚		密封圈	耐压/ MPa
		内径/ mm	抗拉强 度/KN	材质	材质	组合形式	耐温/ ℃	支撑环		
193.7	改进前	57	905	普通合金钢	NBR	双胶筒	177	单支撑	FKM (VITON600)	70
	改进后	57	1 420	镍基合金钢	Aflas	三胶筒	204	双支撑	FFKM (Chemraz)	105
127.0	改进前	45	450	普通合金钢	NBR	双胶筒	177	单支撑	FKM (VITON600)	70
	改进后	45	734	镍基合金钢	Aflas	单胶筒+金属网支撑	204	双支撑	FFKM (Chemraz)	105

2 改进内容

针对常用测试封隔器耐温耐压性能不足、水力锚防上窜能力不够、封隔器通径规和胶筒与套管间隙大等问题,对库车山前常用 127 mm 和 193.7 mm 测试封隔器进行结构改进和材质升级,满足超深超高温高压井试油作业的要求。

2.1 193.7 mm 测试封隔器改进

在进行关键部件结构设计及材料选择时,主要针对机械性能、胶筒结构设计、关键部件进行了改进和优化:

2.1.1 机械性能改进

封隔器在井下坐封后受力情况复杂,封隔器芯轴强度不足极易造成工具断裂引发井下事故复杂。升级封隔器坐封芯轴、胶筒芯轴、容积管等芯轴部件强度,对提升封隔器承压能力至关重要。

坐封芯轴、胶筒芯轴、容积管均优选高强度的不锈钢防硫材料,同时为满足储层改造对管柱通径的需求,在保持芯轴内径 57 mm 的前提下,增大了芯轴的外径,以提高芯轴的承压能力。升级后的 193.7 mm 测试封隔器抗内压强度达到 143 MPa,满足封隔器的设计要求。

2.1.2 胶筒结构设计

理论计算和现场情况均表明,封隔器胶筒在承受高压差时,胶筒肩部容易突出增大、甚至破裂,造成封隔器胶筒密封失效,该失效形式与传统双胶筒结构承受接触应力差、易刮损失效密切相关<sup>[17-19]</sup>。为提升封隔器胶筒的承压强度,胶筒结构由双胶筒改进为“主胶筒+双侧支撑”的组合结构,解决胶筒密封性能差的问题。

改进后的胶筒由两个端胶筒和一个中胶筒组成,端胶筒硬度大,中胶筒硬度软。端胶筒与封隔器金属件接触部位加入金属弹簧设计,经过特殊硫化可显著改善胶筒的受力和变形,从而避免橡胶表层被撕裂的问题;胶筒头部增大锥度设计,降低封隔器下入过程中胶筒刮损失效问题。

基于封隔器设计经验公式<sup>[20]</sup>,胶筒高度、厚度等设计参数具体如下:

(1) 胶筒高度设计

胶筒高度近似计算公式

$$h = \frac{\Delta P(R_i^2 - R_o^2)}{2R_oI + 2R_o f P_o \mu / (1 - \mu)}$$

式中: $R_o$  为套管内半径,mm; $R_i$  为胶筒外半径,mm; $\Delta P$  为工作压差,MPa; $I$  为胶筒许用剪切应力,MPa; $f$  为胶筒与套管壁的摩擦系数,一般取 0.3; $P_o$  为预压载荷,MPa; $\mu$  为波松系数,一般取 0.475。

(2) 填料方式选择

手工填料和注压移模两种填料方式的对比实验表明,采用注压移模填料方式的胶筒外观、断面性质、硫化胶密度等性能均明显优于手工填料。

(3) 端部结构设计

根据力学模拟和试验结果,胶筒在长时间大压缩负荷和流体介质的物理化学作用下,胶筒肩部的应力集中可产生较大的残余变形,最终导致胶筒破坏。根据上述结论,设计了新型胶筒端部结构,其中,改进后的端部胶筒结构如图 2 所示,改进后的中间胶筒结构如图 3 所示。

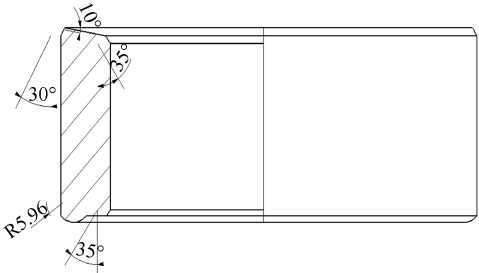


图 2 封隔器端胶筒结构设计

Fig. 2 Structure design of packer end rubber

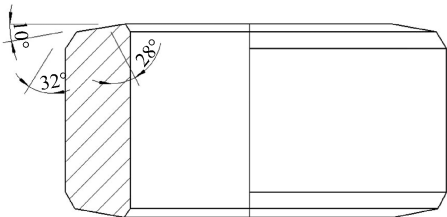


图 3 封隔器中胶筒结构设计

Fig. 3 Structural design of the packer middle rubber



根据模拟和试验结果,新的结构可有效改善胶筒的抗破坏性能,耐压差性能平均提高 30 MPa。

(4) 力学模拟

建立三胶筒接触应力、应变力学模型,如图 4 所示。基于数值模拟结果(见图 5),可以看出,中胶筒在坐封后与套管的接触应力较高,可以起到较好的密封效果。

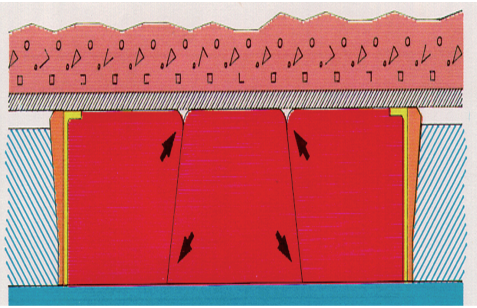


图 4 胶筒接触应力、应变模型

Fig. 4 Contact stress and strain model of rubber

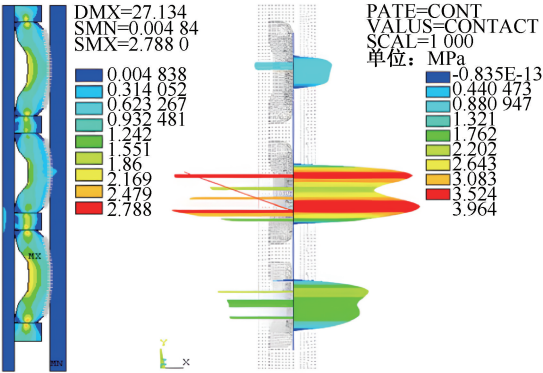


图 5 胶筒接触应力、应变模拟结果

Fig. 5 Results of contact stress and strain of rubber

选用耐高温的 Aflas 氟橡胶为基础材料,结合上述的胶筒结构设计,研制出 193.7 mm 封隔器的耐高压高温胶筒,满足酸性、含 H<sub>2</sub>S 水、原油、天然气介质的工作环境,工作时长可达 30 d,其技术参数见表 2。

表 2 耐高压高温胶筒技术参数表

Table 2 Parameters of HTHP resistant rubber

胶筒部位	耐内压/ MPa	耐外压/ MPa	硬度/ °	工作温度/ ℃
封隔器端胶筒	105	105	95	150
封隔器中胶筒	105	105	90	150

2.1.3 关键部件改进

(1) 水力锚结构改进

水力锚圆形镶齿数量由 6 个增加到 12 个,相同压差情况下,水力锚咬合力大,提高负压存在时封隔器的防上窜的能力。水力锚锚齿密封件由单一

密封圈改进为“支撑密封+密封圈+支撑密封”组合形式,解决了单 O 形密封圈承受较高压差时密封失效的问题。

(2) 整体密封优化

将胶筒心轴与水力锚本体之间的密封方式由开式密封优化为闭式密封,如图 6 所示。封隔器所有密封件均采用 Chemraz 高温密封圈,保证了超高温环境下的密封性能。

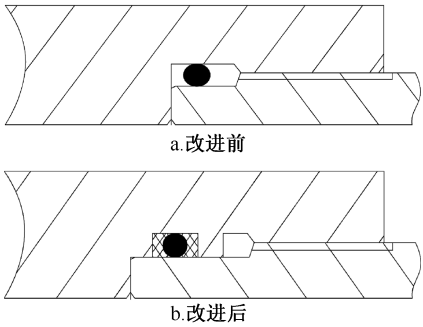


图 6 改进前后芯轴与水力锚配合密封形式对比

Fig. 6 Seal forms Comparison of mandrel and hydraulic anchor before and after improvement

(3) 卡瓦材质改进

封隔器卡瓦齿改进为硬质淬火合金钢,提升了卡瓦咬合承载能力。

2.2 127 mm 测试封隔器改进

基于 193.7 mm 测试封隔器结构改进思路,同样对 127 mm 封隔器芯轴、胶筒、水力锚、密封件等关键结构进行改进及材质升级,封隔器耐温耐压性能达到 210 ℃/105 MPa,封隔器整体耐温、耐压、抗拉强度、密封稳定性和防上窜能力均显著增强。

3 室内实验

参照《井下工具:封隔器和桥塞》(GB/T 20970-2015)标准要求,对改进后的 127 mm、193.7 mm 两种规格封隔器进行胶筒高温承压能力及水力锚动密封承压能力测试。

试验流程:先进行 105 MPa 内压性能测试;随后升温至 150 ℃,开展封隔器坐封、验封试验,检测合格后升温至 210 ℃,开展高温高压正向压差测试,上压腔逐级打压至 110 MPa,中心腔压力 5 MPa,待检测合格后开展高温高压反向压差测试,中心腔逐级打压至 110 MPa,上压腔压力 5 MPa,保压 60 h。最后进行水力锚动密封试验。其中 127 mm 测试封隔器高温高压性能试验结果见表 3。

表 3 127 mm 测试封隔胶筒高温高压试验结果

Table 3 High temperature and high pressure test results of 127 mm test packer

序号	检测项目	标准要求	检测结果
1	启动升温	井筒加热至 150 ℃,保温 1 h	保温 1 h
2	封隔器坐封	温度 150 ℃,正转 5 圈,下压 10 t	封隔器坐封成功
3	封隔器验封	温度 150 ℃,上压腔 30 MPa,稳压 15 min	稳压 15 min
4	启动升温	井筒加热至 210 ℃,保温 2 h	保温 2 h
5	高温高压性能测试-正向压差试验	温度 210 ℃,上压腔打压 40 MPa,中心腔压力 5 MPa,保温保压 15 min	保温保压 15 min
6		温度 210 ℃,上压腔打压 75 MPa,中心腔压力 5 MPa,保温保压 15 min	保温保压 15 min
7		温度 210 ℃,上压腔打压 95 MPa,中心腔压力 5 MPa,保温保压 60 h	保温保压 60 h
8		温度 210 ℃,上压腔打压 110 MPa,中心腔压力 5 MPa,保温保压 60 h	保温保压 60 h
9	高温高压性能测试-反向压差试验	温度 210 ℃,上压腔打压 5 MPa,中心腔压力 40 MPa,保温保压 15 min	保温保压 15 min
10		温度 210 ℃,上压腔打压 5 MPa,中心腔压力 75 MPa,保温保压 15 min	保温保压 15 min
11		温度 210 ℃,上压腔打压 5 MPa,中心腔压力 95 MPa,保温保压 60 h	保温保压 60 h
12		温度 210 ℃,上压腔打压 5 MPa,中心腔压力 110 MPa,保温保压 60 h	保温保压 60 h 13 min

从检测结果可以看出,127 mm 封隔器胶筒在高温高压正向、反向压差试验下密封性能可靠。封隔器拆解后,胶筒及本体无可见变形和损坏,满足更换密封件并保养后重新使用的要求。采用同样的试验流程对 193.7 mm 封隔器进行室内试验,封隔器各项性能均满足设计要求。

4 应用情况

为进一步验证改进后 127 mm 和 193.7 mm 封隔器在高压高温及重浆环境中的整体性能,先后在博孜 2、克深 8~17 井进行了现场试验。

博孜 2 井地层温度 136 ℃,改进后的 127 mm 测试封隔器封位 7610 m,施工期间封隔器密封良好、解封正常;克深 8~17 井地层温度 136 ℃,改进后的 193.7 mm 封隔器封位 6 126 m,封隔器全程未出现压力窜漏,解封正常未遇阻,耐温、抗压性能良好。

截止目前,改进后的 127 mm 和 193.7 mm 高温高压测试封隔器在塔里木库车山前累计应用 5 井次,试验成功率 100%。

5 结论

(1)通过对 127 mm 和 193.7 mm RTTS 封隔器的芯轴、胶筒、水力锚、密封件等关键结构改进及材质升级,使得该型两种尺寸封隔器耐温由 177 ℃上升至 204 ℃,耐压由 70 MPa 上升至 105 MPa,封隔器整体耐温、耐压、抗拉强度、防上窜能力均得到显著提升。

(2)改进后的封隔器通过内压性能测试、胶筒高温承压能力及水力锚动密封承压能力等室内测试,实现 210 ℃时 105 MPa 正、反向差压密封,满足高温高压测试封隔器应用需求。在博孜 2、克深 8~

17 井复杂井况工况条件下完成了现场试验,工具指标整体达到国际领先水平。

(3)改进后的测试封隔器适用于克深 9、克深 13 等地层深度超过 7 000 m、地层压力大于 120 MPa、地层温度高于 177 ℃的相似井况,保障了塔里木库车前陆区高温高压区块的安全试油作业,为加快超深、超高压油气勘探开发储备关键配套核心技术。

致谢:感谢中国石油天然气股份有限公司提供技术支持。

参考文献

[1] 阎根岐, 谢宇, 高尊升, 等. 超深超高压高温井试油工艺[J]. 油气井测试, 2009, 18(1):59-60.  
YAN Genqi, XIE Yu, GAO Zunsheng, et al. Well test technique applied in the superdeep well with superhigh pressure and superhigh temperature [J]. Well Testing, 2009, 18(1):59-60.

[2] 彭永洪, 魏波, 宋雷勇, 等. 超深高温高压井 APR 测试工具失效分析与措施研究[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5):38-41.  
PENG Yonghong, WEI Bo, SONG Leiyong, et al. Failures analysis and methods study of APR testing tools in ultra-deep well with high temperature and high pressure[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(5):38-41.

[3] 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):56-59.  
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):56-59.

[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 well in Kuqa[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5):42-45.
- [5] 陈华良, 刘兴华, 徐茂荣, 等. 克深 902 井 APR 测试工具应用与认识[J]. 钻采工艺, 2016, 39(5):96-98. CHEN Hualiang, LIU Xinhua, XU Maorong, et al. Application of APR testing tool in well Kes902[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5):96-98.
- [6] 陈友斌, 邹永清, 陈国庆, 等. APR 测试工具失效时的井控难题及处理措施[J]. 天然气工业, 2012, 32(1):98-101. CHEN Youbin, ZOU Yongqing, CHEN Guoqin, et al. Well control problems and countermeasures after the failure of annulus pressure responsive (APR) tools[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1):98-101.
- [7] 毛军, 张同义, 毛庆, 等. APR 完井测试技术在异常压力储层测试策略分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3):52-55. MAO Jun, ZHANG Tongyi, MAO Qin, et al. Pilot application of APR completion testing technology in abnormal pressure reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3):52-55.
- [8] 王林, 陈志忠, 孙宝, 等. RTTS 封隔器高压失效原因分析[J]. 油气井测试, 2015, 24(5):72-74. WANG Lin, CHEN Zhizhong, SUN Bao, et al. Reason analysis of RTTS packer being failure because of high pressure[J]. Well Testing, 2015, 24(5):72-74.
- [9] 徐刚, 张斌, 李进, 等. 244.5 mm 套管三胶筒隔离封隔器研制[J]. 矿场石油机械, 2020, 49(1):60-63. XU Gang, ZHANG Bin, LI Jin, et al. Development and test of isolation packer with three rubber used in 244.5 mm casing[J]. Oil Field Equipment, 2020, 49(1):60-63.
- [10] 闫志远, 张斌, 吴永朝, 等. 新型高温高压封隔器组合式胶筒结构设计及试验[J]. 石油矿场机械, 2021, 50(1):99-104. YAN Zhiyuan, ZHANG Bin, WU Yongchao, et al. Structure design and test of a new of combined rubber barrel for high temperature and high pressure packer [J]. Oil Field Equipment, 2021, 50(1):99-104.
- [11] 庞振力, 刘孝强, 季鹏, 等. 139.7mm 套管高温高压测试封隔器研制[J]. 油气井测试, 2021, 30(6):22-27. PENG Zhenli, LIU Xiaoqiang, JI Peng, et al. Development of high temperature and high pressure testing packer for casing with diameter of 139.7mm [J]. Well Testing, 2021, 30(6):22-27.
- [12] 高攀. 耐高温高压封隔器的研发[J]. 江汉石油职工大学学报, 2019, 32(6):54-57. GAO Pan. Research and development of high temperature and high pressure packer[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2019, 32(6):54-57.
- [13] 韩永亮, 王玥, 张华, 等. K344 型可溶辅助解封压裂封隔器研制与应用[J]. 油气井测试, 2022, 31(3):34-38. HAN Yongliang, WANG Yue, ZHANG Hua, et al. Development and application of K344 soluble auxiliary-releasing fracturing packer[J]. Well Testing, 2022, 31(3):34-38.
- [14] 王志坚, 邓卫东, 林忠超, 等. 水平井封隔器卡瓦的有限元分析及结构改进[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(4):78-81. WANG Zhijian, DENG Weidong, LIN Zhongchao, et al. Finite element analysis and structure improvements of packer slip in horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4):78-81.
- [15] 陈勇, 李陈, 卢齐, 等. 气体驱动中途测试封隔器研制[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3):114-118. CHEN Yong, LI Chen, LU Qi, et al. Development of a gas-driven DST Packer[J]. Drilling and Production Technology, 2022, 45(3):114-118.
- [16] CHEN Yong, LIU Xin, CHEN Li. Development of rubber packing element for 105 MPa/215 °C deep-well test packer[J]. Materials, 2022, 15(6):65-74.
- [17] 刘松, 吴静, 董晓明. 压缩式封隔器胶筒结构改进及密封性能分析[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(2):67-70. ZHANG Xin, XU Xingping, WANG Lei. Sealing performance analysis and structure improvement on compressed packers rubber[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(1):62-66.
- [18] 张辛, 徐兴平, 王雷. 封隔器胶筒结构改进及优势分析[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(1):62-66. ZHANG Xin, XU Xingping, WANG Lei. Analysis of comparative advantage and structure improvement of packer rubber[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(1):62-66.
- [19] 关卫国. 三胶筒封隔器密封单元结构参数优化分析[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(9):45-49. GUAN Weiguo. Optimal analysis of structure parameters of three glue plate sealing unit [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(9):45-49.
- [20] 朱晓荣, 吴雷泽, 代理震. 封隔器设计基础[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012:20-24.

编辑 刘振庆

第一作者简介:程莹,女,1995 年出生,西安石油大学机械设计专业硕士研究生在读。电话:18186158290; Email:1040433645@qq.com。通信地址:陕西省西安市西安石油大学机械工程学院,邮政编码:710000。