

超高温地层测试密封系统的研制

范俊强¹,周亮¹,周元杰¹,侯卫宁¹,李一民¹,吴海欧²

- 1. 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
- 2. 中国石油集团测井有限公司塔里木分公司 新疆库尔勒 841000

通讯作者:Email: fanjunqiang@cnpc.com.cn

项目支持:中国石油集团渤海钻探工程有限公司科技研发项目“智能地层测试系统研制”(2019ZD04K)

引用:范俊强,周亮,周元杰,等. 超高温地层测试密封系统的研制[J]. 油气井测试,2021,30(6):16-21.

Cite: FAN Junqiang,ZHOU Liang,ZHOU Yuanjie, et al. Development of sealing system for ultra-high temperature formation testing [J]. Well Testing, 2021,30(6):16-21.

摘要 为保证超高温井地层测试时密封圈及胶筒的密封效果,对全氟密封件进行研究,对胶筒结构进行改进,研制出全氟醚橡胶密封圈、端部防突全氟橡胶胶筒。将钻杆扣的端面密封改为盖斯扣的全氟醚橡胶件密封,加强了测试管柱中各工具之间连接部位的密封性能;改变球阀系统中上球座的密封位置,增强工具内部密封组件性能,使测试管柱密封系统更适应超高温地层。经华北油田杨税务潜山 6 井次负压测试阀联作工艺及 2 井次油管传输射孔工艺应用,均顺利施工取得完整地层资料,应用效果良好。改进后的测试管柱拓展了地层测试技术的应用范围,为超高温油气井的勘探开发提供了技术支撑。

关键词 超高温井;地层测试;密封系统;封隔器胶筒;全氟醚橡胶密封圈;盖斯扣密封;球阀

中图分类号:TE27 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.06.003

Development of sealing system for ultra-high temperature formation testing

FAN Junqiang¹, ZHOU Liang¹, ZHOU Yuanjie¹, HOU Weining¹, LI Yimin¹, WU Hai'ou²

- 1. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China
- 2. Tarim Branch, CNPC Well Logging Co., Ltd., Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: To ensure the sealing effect of sealing ring and rubber cylinder in formation testing process of ultra-high temperature well, perfluoroether rubber sealing ring and end anti bulge perfluoroethylene rubber cylinder are developed in this paper by analyzing the perfluorinated sealing parts and improving the structure of the rubber cylinder. The end face sealing of the drill pipe buckle is changed into the perfluoroether rubber sealing of the gus buckle, which strengthens the sealing performance of the connecting parts between the tools in the test string. Then, change the sealing position of the upper ball socket in the ball valve system to enhance the performance of the internal sealing components of the tool, and make the test string sealing system more suitable for ultra-high temperature formation. After the application of negative pressure test valve combination technology in 6 well-times and tubing transmission perforation technology in 2 well-times in Yangshui buried hill of Huabei Oilfield, the construction process is successful obtained the complete formation data and showed the great application effect. The improved test string expands the application scope of formation testing technology and provides technical support for the exploration and development of ultra-high temperature oil and gas wells.

Keywords: ultra-high temperature well; formation test; sealing system; packer rubber cylinder; perfluoroether rubber sealing ring; Gus buckle seal; ball valve

随着油气田勘探业务逐步向深井、超深井的区块拓展,地层温度越来越高。特别是华北油田近两年进行的杨税务潜山地层勘探,储层均深埋 5 200 m 以上,温度超过 170 ℃,地层平均地温梯度 2.91 ℃/100 m^[1-3]。在这种超高温地层条件下进行测试射孔联作时,测试工具密封系统的可靠性将起到至关重要的作用。如果在超高温条件下,密封系统失

效,就会导致测试失败^[4-6]。在地层测试密封系统里的轴密封、孔密封、防尘密封、导向密封,以及固定密封等方面,使用最多的是 O 型密封圈、唇型密封垫等密封件。测试工具中的密封件通常会采用橡胶材质^[7]。彭旭东等^[8]的研究介绍了丁腈橡胶具有很好的耐油性和柔韧性,在高温下具有良好的抗挤性能,但一般只在低于 150 ℃ 的环境中使用且

不耐硫化氢和缓蚀剂。梁滔^[9]通过对氢化丁腈橡胶的硫化和老化体系进行分析,研究出氢化丁腈橡胶具有良好的耐腐蚀性,可在 150 ℃ 环境下长期使用。贺秋云等^[10]报道了常规氟橡胶件可用于 150~170 ℃ 的工作环境。这三种材质都不能满足长期使用在超高温井 200 ℃ 以上的工作环境中。

测试管柱依靠封隔器封闭环空,封隔器胶筒的密封性与稳定性直接影响封隔器的可靠性^[11]。而胶筒的密封性能与胶筒的材料,结构,硬度,坐封力,环境介质,环境温度,胶筒与套管壁之间的摩擦力、胶筒的密封压力等级等诸多因素有关^[12-13]。张付英等^[14-15]报道了常规氟橡胶密封胶筒在压力不大的环境中使用时,可以稳定形变。但压力较大时,常规氟橡胶密封胶筒上下端面会由于应力集中引起“肩裂、肩突”现象,使胶筒的密封能力降低甚至密封失效。张毅等^[16]研制了新型可降解压裂封隔器胶筒,并将其安装在 Y441 封隔器上,在留 107-92X 井压裂施工完成后起出管住,胶筒已完全溶解,解决了普通胶筒承压过大时不易解封的难题,但这种胶筒耐温只有 120 ℃。

为了保障测试管柱的适用性,经常采用全通径工具配合各种工艺施工^[17-19]。其密封部件主要包括内部球阀密封及外部各工具间的连接密封。连接扣和球阀等金属件的磨损容易造成密封失封^[20-22]。因此,根据超高温井对地层测试的要求,对密封件、胶筒、球阀密封、连接扣密封等关键部位进行研究,形成了密封件可耐 200 ℃ 以上高温、胶筒可承载较高压力、管柱工具内外密封不易失封的超高温地层测试密封系统。

1 超高温密封件研究

在测试工具橡胶选材方面,高于 200 ℃ 只能用全氟醚橡胶。全氟醚橡胶是在氟橡胶的基础上改进的另一类胶料,即用烷基乙烯基醚单体代替氟橡胶中的全氟丙烯单体共聚而成的胶料。由于醚键的引入,除保留氟橡胶优异的耐高温性能外,还具有良好的耐低温性能,可在-55~275 ℃ 长期使用,在 300 ℃ 短期(24 h)使用。

根据杨税务潜山地层测试的需求,研制出超高温全氟醚橡胶密封圈,并进行室内试验。试验时,室内温度 23 ℃ (表 1)。

从试验结果可以看出,新研制的全氟醚橡胶密封圈基础性能均符合目标要求值,在 230 ℃ 试验温

度下各项指标均符合要求。

表 1 全氟醚橡胶试验数据表			
Table 1 Test data sheet of perfluoroether rubber			
试验名称	参数	要求值	实测值
常规试验	硬度/A	90±5	91
	扯断强度/MPa	≥10	18
	扯断伸长率/%	≥175	200
热老化测试 ^①	硬度变化/%	-5~+10	+1
	拉力变化/%	≤-45	+2
	伸长率变化/%	≤-20	-24
压缩永久变形 ^②	压缩永久变形/%	≤30	22
耐介质测试 ^③	硬度变化/%	0~-15	-8
	体积变化/%	-1~+20	+14.5
低温脆性试验	脆性温度/℃	≤-20	-26

注:①230 ℃, 70 h;②230 ℃, 72 h;③230 ℃, 70 h(介质名称:3#标准油)。

2 超高温封隔器胶筒的研制

设计封隔器胶筒结构,针对影响胶筒性能的主要参数,选用氟橡胶制作胶筒,并对封隔器胶筒进行室内试验。

2.1 影响胶筒性能的主要参数

- (1) 温度;
- (2) 机械性能(影响胶筒的密封能力、压缩性能、回弹性能);
- (3) 使用环境介质。

2.2 氟橡胶胶筒主要性能

- (1) 机械物理性能优越,高温下永久变形小,具有优越的耐热性,在 200 ℃ 温度下,可以持续使用,耐 250 ℃ 高温;
- (2) 耐油,耐酸,耐碱,耐 CO₂ 等,性能好;
- (3) 工艺性能好,耐焦烧时间长,黏度低,流动性好。

2.3 封隔器胶筒结构设计

封隔器在测试作业中通过胶筒对环空起到封闭作用,胶筒的性能决定了坐封的成败。氟橡胶材料制作的胶筒在承压方面能力有限,所以以添加附加支撑部件的方式提高胶筒的承压能力。合适的结构设计,添加能够起到加强承压的机械结构,可以有效保护胶筒结构在高压下不受损坏,并降低胶筒的坐封力。

RTTS 封隔器胶筒常规结构如图 1 所示,两只完全相同的氟胶料胶筒,中间用隔环隔开。在压力不大时,可以稳定形变。通过在普通 RTTS 封隔器胶筒的端部增加防突结构(图 2),解决了应力集中造成的“肩裂、肩突”现象,可提高密封能力。

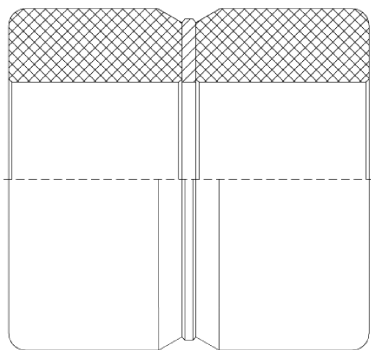


图 1 封隔器胶筒常规结构示意图

Fig. 1 General structure diagram of packer rubber cylinder

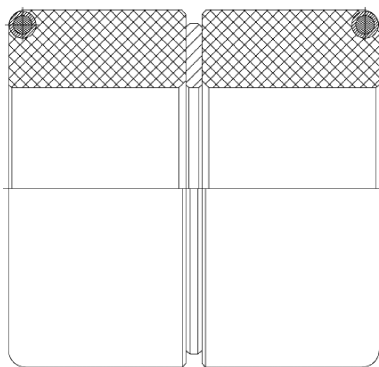


图 2 端部带防突的封隔器胶筒改进结构示意图

Fig. 2 Improved structure schematic diagram of rubber cylinder with anti-bulge packer at the end

2.4 封隔器胶筒性能室内试验

(1) 通过地面试验模拟试验装置, 确认胶筒密封性能(图 3)。使用硅油作为实验介质, 最高试验温度 230 ℃, 最高试验压力 70 MPa。

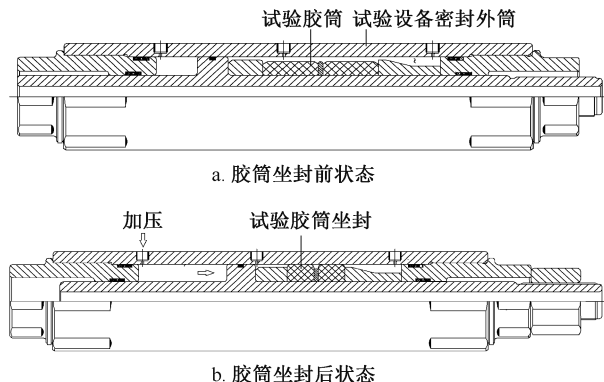


图 3 地面模拟试验装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of ground simulation testing device

(2) 主要试验步骤和要求:

a. 组装和升温。将胶筒装在试验装置中, 送入保温炉中升温;

b. 胶筒坐封。保温结束后, 按最大坐封力坐封胶筒;

c. 胶筒上端高温密封试验。在 230 ℃ 温度下, 依次进行 25 MPa/24 h, 50 MPa/96 h, 60 MPa/4 h 密封试验;

d. 胶筒下端高温密封试验。在 230 ℃ 温度下进行 20 MPa/48 h 试验;

e. 拆开检查。试验结束后, 冷却试验装置, 拆检。

(3) 试验过程:

a. 升温。将试验装置送入保温炉, 升温至工作温度 230 ℃, 并保温 8 h 以上;

b. 胶筒坐封。最高坐封力 60 kN(约 6 t 力);

c. 胶筒上端高温保压试验。初始压力 60 MPa 保温 4 h 后, 压力升至 66 MPa。随后一直保持, 共保温 24 h, 无渗漏;

d. 胶筒下端高温保压试验。初始加压至 60 MPa 经 24 h 保温, 压力 65 MPa。胶筒上端有轻微渗漏; 再经 24 h 压力降至 55 MPa, 胶筒上端有轻微渗漏; 再经 48 h 压力保持在 55 MPa, 胶筒上端有轻微渗漏。试验结束, 累计在 230 ℃ 高温下保压 4 d 时间。

该试验所用的 O 型圈密封件的工作温度为 204 ℃, 在试验周期内工作在 230 ℃ 约 6 d(静密封状态)未出现密封失效。

3 测试工具密封结构改进

对测试工具连接处和球阀上球座密封进行了改进。

3.1 测试工具连接处密封系统改进

超高温地层测试主要采用 STV、MFE 测试工具进行测试, 但这些测试工具中部分连接扣采用钻杆扣连接, 如多流测试器与液压锁紧接头连接处就是采用钻杆扣连接。采用金属扣密封方式进行密封, 在高温高压下容易出现刺漏现象。为此, 将所有钻杆扣密封改进为盖斯扣密封方式(图 4、图 5), 提高测试管柱的密封性。

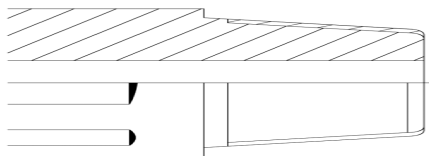


图 4 钻杆扣密封示意图

Fig. 4 Schematic diagram of drill pipe buckle seal

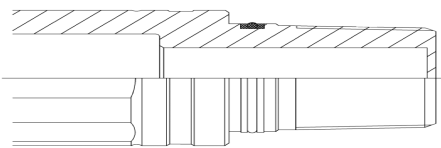


图 5 盖斯扣密封示意图
Fig. 5 Schematic diagram of Gus buckle seal

3.2 球阀上球座密封系统改进

在测试时,球阀系统的密封是靠上球座与球进行的密封。因此,上球座的密封非常关键。之前上球座与球笼之间的密封圈设置在球座上,容易导致密封圈轻微破损,影响高温条件下密封效果。为了防止密封件受影响,改进此处的密封件安装位置,在球笼上设计密封槽(图 6),将密封件放在球笼内,避免安装时密封件受伤害。

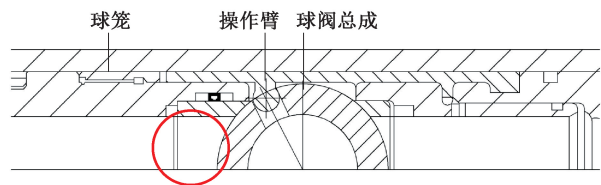


图 6 球座密封示意图
Fig. 6 Schematic diagram of ball seat seal

4 超高温密封件的应用

华北油田冀中坳陷廊固凹陷河西务构造带杨税务潜山储层是目前渤海湾盆地最深、温度最高、最复杂的碳酸盐岩潜山油气藏。安探 4X 井是杨税务潜山构造上一口预探井,其地质层位是下马家沟组,通过井身结构可知(图 7),人工井底为 5 804.00 m。经测井对地层分析可知,下马家沟组(5 217.00 ~ 5 424.00 m,厚 207.00 m)是全井段储层最为发育的层段,储层连续厚度大,共解释 128.80 m/35 层,其中 I 类储层 18.60 m/5 层,II 类储层 46.60 m/13

层;下马家沟组以裂缝-孔隙储层为主。上部 223 号层(5 277.80~5 282.80 m),厚 5.00 m,深浅侧向差异大,电阻率 314.4 $\omega\cdot m$,孔隙度 7.6%,成像显示溶孔,溶蚀缝发育,为孔隙-裂缝型储层,解释为 I 类储层;224 号层(5 285.00~5 288.00 m),厚 3.00 m,电阻率 204 $\omega\cdot m$,孔隙度 4.8%,成像显示裂缝发育,为孔隙-裂缝型储层,解释为 I 类储层。下部 238 号层(5 361.80 ~ 5 364.40 m),224 号层(5 387.40~5 392.00 m),深浅侧向差异大,电阻率为 435.6 $\omega\cdot m$ 、249.1 $\omega\cdot m$,孔隙度 6.5%、6.1%,成像显示裂缝发育,为裂缝型储层,解释为 I 类储层。

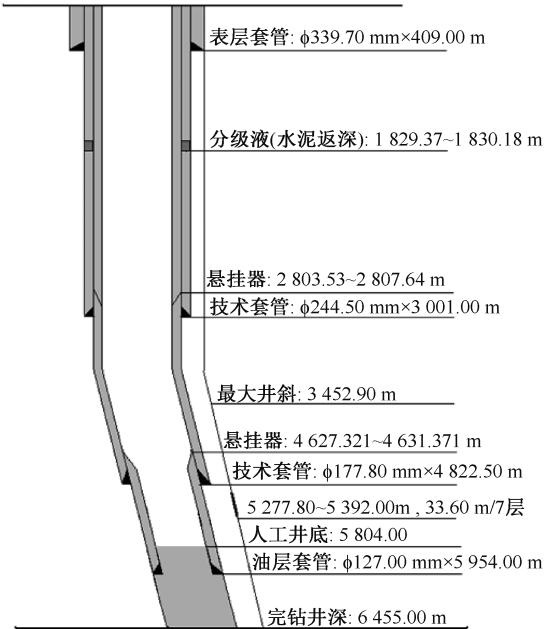


图 7 安探 4X 井井身结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of wellbore structure of Well Antan 4X

该井采用负压测试阀射孔联作工艺进行施工,射孔井段为 5 277.80~5 392.00 m(表 2)。工作制度为一开一关。

表 2 安探 4X 井测试井段数据表
Table 2 Data sheet of the testing well section of Well Antan 4X

层号	层位	测试井段/m	厚度/m	层数	孔隙度/%	电测解释
1	O _{2x}	5 277.80~5 288.00	8.20	2	7.6/4.8	I 类储层
1	O _{2x}	5 312.40~5 330.60	8.20	2	2.4	II、III 类储层
1	O _{2x}	5 354.80~5 364.40	9.60	2	4.0/6.5	I、II 类储层
1	O _{2x}	5 364.40~5 392.00	10.20	2	3.7/6.1	I、II 类储层

在安探 4X 井施工中,超高温地层测试密封系统主要体现在负压测试阀球阀总成部分、RTTS 封隔器胶筒部分,以及各工具之间的盖斯扣连接部位。该井采用的测试管柱(自下而上)为:枪尾+射孔枪+夹层枪+压控点火头+油管+筛管密封接头+减震器+

扶正器+RTTS 封隔器+传压接头+RTTS 安全接头+液压旁通+负压测试阀+RD 循环阀+油管+校深短节+油管柱。其测试流程如下:
(1)下放测试管柱,把测试工具送到目的层。
(2)通过校深对工具所在深度进行精确测量。

(3)根据校深结果,调整坐封位置,上提方余2.39 m,正转18圈,下放加压120 kN完成坐封。

(4)环空打压18 MPa,打开负压测试阀,完成一开井,环空液面稳定在井口。

(5)射孔,泡泡头气泡由弱变强。

(6)地面关井。

(7)环空打压25.8 MPa,打开RDS阀,完成一关井。

(8)上提680 kN解封,起钻。

从安探4X井测试曲线可以看出(图8),在整个测试过程中,最高井温173.75℃,初静液柱压力49.06 MPa,终静液柱压力49.15 MPa。测试前后静液柱压力显示测试管柱无渗漏。测试施工取得完整的测试资料,测试管柱密封性能良好,能够适应超高温条件下的测试需求。

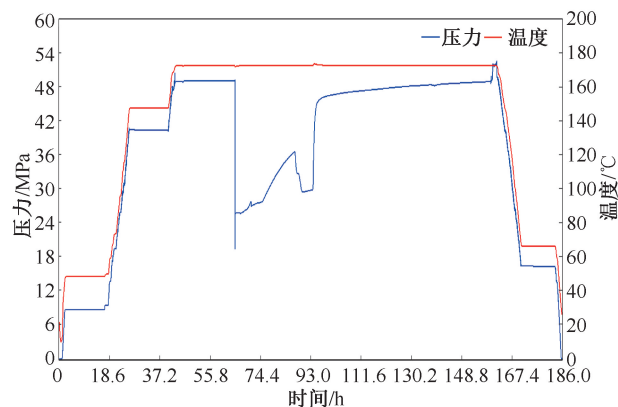


图8 安探4X井压力恢复曲线图

Fig.8 Pressure buildup curve of Well Antan4X

随后,超高温地层测试密封系统在杨税务潜山地层进行了6井次负压测试联作工艺(包括安探4X井C1-1,安探2X井C2-2,安探5X井C1-2,安探5X井C2-1,安探5X井C3-1,务古1加深井)、2井次油管传输射孔工艺(安探5X井、安探2X井3-1)应用,均顺利施工取得完整地层资料,未出现密封件失效、胶筒失封、测试工具渗漏的现象,应用效果良好,充分证明了超高温地层测试密封系统的稳定性。

5 结论

(1)通过对超高温地层测试密封系统的研发,研制出的全氟醚橡胶密封圈、全氟橡胶胶筒,能在230℃的高温条件下保持性能稳定,加强了封隔器胶筒对管柱环空的密封能力。

(2)对测试工具连接扣密封方式以及内部球阀密封方式的优化,能够有效防止工具渗漏,使之更

能适应超高温地层测试,提高了施工质量。

(3)超高温地层测试密封系统在杨税务潜山地层勘探中的实际应用,取得良好的效果。可以将密封系统在其他超高温区块进行普及应用,为超高温油气井的勘探开发提供了技术支撑。

致谢:感谢渤钻油气井测试分公司和华北油田公司勘探事业部同意本文公开发表;感谢测试分公司工程技术科、国际项目经理部、测试项目部,以及地质研究中心对本文撰写提供的帮助和支持。

参考文献

- [1] 张以明,李拥军,崔数清,等. 杨税务潜山高温油气藏勘探突破的关键井筒技术[J]. 石油钻采工艺,2018,40(1):20-26.
ZHANG Yiming, LI Yongjun, CUI Shuqing, et al. Key wellbore technologies for the exploration breakthrough of high-temperature oil and gas reservoirs in Yangshuiwu buried hill [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(1):20-26.
- [2] 王亚,王孟华,田建章,等. 一种适用于深潜山及内幕的有效储层地震预测方法——以廊固凹陷杨税务潜山为例[J]. 地球物理学进展,2019,34(5):1930-1937.
WANG Ya, WANG Menghua, TIAN Jianzhang, et al. Effective reservoir seismic prediction method for deep and inner buried-hill: Talking Yangshuiwu buried-hill in Langgu sag for example [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5):1930-1937.
- [3] 杨文权,张宇,程智,等. 超高温钻井液在杨税务潜山探井中的应用[J]. 钻井液与完井液,2019,36(3):298-302,307.
YANG Wenquan, ZHANG Yu, CHENG Zhi, et al. Application of an ultra-high temperature drilling fluid in deep well drilling in Yangshuiwu buried hill [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019,36(3):298-302,307.
- [4] 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(4):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(4):38-41.
- [5] 龚浩,唐庚,张林,等. 川西地区超深高温高压气井完井试油技术研究与应用[J]. 钻采工艺,2020,43(S1):61-63.
GONG Hao, TANG Geng, ZHANG Lin, et al. Research and application of well completion and testing technology for ultra-deep HTHP gas wells in Western Sichuan Area [J]. Drilling & Production Technology, 2020,43(S1):61-63.
- [6] 潘勇,王娟,张权,等. 深井高温高压储层新型分层改造

- 工具研制与应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5): 71-74.
- PAN Yong, WANG Juan, ZHANG Quan, et al. Development and application of a new layered reconstruction tool for deep well in high temperature and high pressure reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(5): 71-74.
- [7] 曾德智, 李坛, 雷正义, 等. 橡胶 O 圈耐 CO₂ 腐蚀测试及适用性评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 145-152.
- ZENG Dezhi, LI Tan, LEI Zhengyi, et al. CO₂ corrosion resistance test and applicability evaluation of rubber O-ring [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 145-152.
- [8] 彭旭东, 王玉明, 黄兴, 等. 密封技术的现状与发展趋势[J]. 液压气动与密封, 2009, 29(4): 4-11.
- PENG Xudong, WANG Yuming, HUANG Xing, et al. State of the art and future development of sealing technology [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009, 29(4): 4-11.
- [9] 梁滔. 氢化丁腈橡胶的加工技术与应用进展[J]. 合成橡胶工业, 2017, 40(2): 158-163.
- LIANG Tao. Advances of processing technology and application of hydrogenated nitrile rubber [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2017, 40(2): 158-163.
- [10] 贺秋云, 韩雄, 曾小军. 高温高压井下测试工具橡胶密封件材料的优选[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 36-39.
- HE Qiuyun, HAN Xiong, ZENG Xiaojun. How to decide optimal rubber seal elements for HPHT down-hole testing tools [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(4): 36-39.
- [11] 张付英, 郭威, 张玉飞. 三种结构封隔器胶筒变形稳定性对比研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(3): 95-99.
- ZHANG Fuying, GUO Wei, ZHANG Yufei. Comparative study on deformation stability of packer rubbers with three structures [J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(3): 95-99.
- [12] 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(4): 67-70.
- LIU Song, WU Jing, DONG Xiaoming. Sealing performance analysis and structure improvement on compressed packers rubber [J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(4): 67-70.
- [13] 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.
- [14] 张付英, 董城城, 水浩澈, 等. 封隔器胶筒关键因素分析及创新概念设计[J]. 机械设计, 2020, 37(5): 98-105.
- ZHANG Fuying, DONG Chengcheng, SHUI Haoche, et al. Analysis on the key factors of packer rubber and its innovative design [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(5): 98-105.
- [15] 张付英, 张玉飞, 李天天, 等. 封隔器胶筒变形稳定性分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(5): 34-39.
- ZHANG Fuying, ZHANG Yufei, LI Tiantian, et al. Stability analysis of deformation process of packer rubber [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(5): 34-39.
- [16] 张毅, 李景卫, 杨小涛, 等. 新型可降解压裂封隔器胶筒[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 51-55.
- ZHANG Yi, LI Jingwei, YANG Xiaotao, et al. New degradable fracturing packer rubber [J]. Well Testing, 2019, 28(2): 51-55.
- [17] 张兴华, 周新宇, 杨子, 等. ARP 测试工艺在压裂测试井中的技术创新[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 13-18.
- ZHANG Xinghua, ZHOU Xinyu, YANG Zi, et al. Technical innovation of APR testing technology in fracturing test wells [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 13-18.
- [18] 李俊杰. 地层测试(试油)技术的发展及展望[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 71-74.
- LI Junjie. Development and prospect for well test (oil test) technology [J]. Well Testing, 2016, 25(5): 71-74.
- [19] 王天巧, 黄志遂, 庄明之. 新型全通径压控测试阀[J]. 油气井测试, 2004, 13(1): 72-74.
- WANG Tianqiao, HUANG Zhisui, ZHUANG Mingzhi. New model pressure controlled full bore testing valve [J]. Well Testing, 2004, 13(1): 72-74.
- [20] 鹿成亮, 周元杰, 黄生松, 等. 选择测试阀在现场测试中的应用[J]. 油气井测试, 2006, 15(3): 59-61.
- LU Chengliang, ZHOU Yuanjie, HUANG Shengsong, et al. Application of Selected Well Testing Valve in Field Operation [J]. Well Testing, 2006, 15(3): 59-61.
- [21] 李三喜, 冯大龙, 黄伟, 等. 一种安全高效的多功能测试管柱[J]. 钻采工艺, 2019, 42(2): 128-130.
- LI Sanxi, FENG Dalong, HUANG Wei, et al. A kind of safe and efficient multi-function test string [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(2): 128-130.
- [22] 王汉, 李玉飞, 蒲俊余, 等. 多封隔器完井管柱优化研究[J]. 钻采工艺, 2020, 43(S1): 8-11.
- WANG Han, LI Yufei, PU Junyu, et al. Study on Multi-packer Completion String Optimization [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(S1): 8-11.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 范俊强, 男, 1983 年出生, 硕士, 工程师, 2012 年毕业于长江大学矿产普查与勘探专业, 现从事油气井地层测试技术、试井评价解释技术等方面工作。电话: 0317-2552227, 18632768271; Email: fanjunqiang@cnpc.com.cn。通信地址: 河北省廊坊市广阳区万庄石油渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司, 邮政编码: 065007。