

地层测试工具耐 230 °C O 型密封圈优选试验研究

潘登, 张洋, 王东林, 贾海, 周继东

中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司 四川成都 610052

通讯作者: Email: pandeng_sc@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油集团公司项目“230 °C/140 MPa 抗硫试油测试关键装备研制”(2021ZG09); 中国石油川庆钻探公司项目“适用非常规套管的 200 °C/105 MPa 完井封隔器及 150 °C/105 MPa 井下安全阀研制”(CQ2022B-46-1-4)

引用: 潘登, 张洋, 王东林, 等. 地层测试工具的耐 230 °C O 型密封圈优选试验研究[J]. 油气井测试, 2024, 33(2): 15-20.

Cite: PAN Deng, ZHANG Yang, WANG Donglin, et al. Experimental study on optimal selection of O-ring seals resistant to 230 °C for formation testing tools[J]. Well Testing, 2024, 33(2): 15-20.

摘要 为了在设计地层测试工具的过程中优选出抗高温、承高压、抗腐蚀能力强及密封性好的 O 型橡胶密封圈, 研制了可满足多型号 O 型密封圈共用的模拟试验工装。该工装可模拟高温高压条件以及密封圈的不同的装配方式, 进行性能评价试验; 同时以适应工程应用为评价原则设计了一套充分模拟地层测试作业中温度、压力变化过程和边界参数的评价试验方法, 对多个型号的耐高温的 O 型密封圈开展了试验评价。针对 230 °C/105 MPa 地层测试工具设计, 优选出了 3 种具有较好的高温承压能力和密封持久性能的密封圈, 其基材是全氟醚橡胶, 在浓度 20% 的盐酸中浸泡 96 h, 经两次升温至 230 °C, 一次降温至常温的温度交变过程中, 都能反复承受长达 48 h 的高压(105 MPa)密封测试, 该试验为加快高温高压测试工具的研发进程奠定了基础。

关键词 地层测试; 工具设计; 高温; 高压; 抗腐蚀; O 型密封圈; 试验工装

中图分类号: TE27 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.02.003

Experimental study on optimal selection of O-ring seals resistant to 230 °C for formation testing tools

PAN Deng, ZHANG Yang, WANG Donglin, JIA Hai, ZHOU Jidong

CCDC Well-Intervention Company, Chengdu, Sichuan 610052, China

Abstract: In order to optimally select O-ring rubber seals with high temperature resistance, high pressure resistance, strong corrosion resistance, and good sealing performance during the design of formation testing tools, a simulation test fixture capable of accommodating multiple types of O-ring seals was developed. This fixture can simulate high temperature, high pressure conditions, and different assembly methods of the seals for performance evaluation tests. Meanwhile, a set of evaluation test methods was designed based on engineering application principles, which can fully simulate the temperature, pressure variations and boundary parameters during formation testing operations. Evaluation tests were conducted on multiple types of high-temperature-resistant O-ring seals. For the design of formation testing tools operating at 230 °C/105 MPa, three types of seals with excellent high-temperature pressure resistance and sealing durability were selected. These seals, made of perfluoro rubber, were subjected to a temperature cycling process from room temperature to 230 °C in 20% hydrochloric acid immersion for 96 hours, repeatedly enduring 48 hours of high-pressure (105 MPa) sealing tests. This experiment laid a foundation for accelerating the development process of high-temperature and high-pressure testing tools.

Keywords: formation testing; tool design; high temperature; high pressure; corrosion resistance; O-ring seal; test fixture

地层测试工具的密封普遍采用橡胶密封的方式^[1], 因此 O 型密封圈是其至关重要的配件。地层测试工具在井筒内工作, 面临井底高温、高压的作业环境, 对于 O 型密封圈的两个主要的考核技术指标即耐压值和耐温值。另外, 地层测试作业期间,

井下测试工具的 O 型密封圈会直接接触酸液、天然气、钻井液、有机或无机的完井工作液等腐蚀介质^[2-3], 而在酸化、放喷及压井期间, 受流体的流动影响, 井筒温度会产生高低温交替变化, 这些苛刻的环境条件, 对 O 型密封圈的工作性能都产生了严

重的影响^[4-5]。因此,选择性能优异 O 型密封圈,是确保地层测试工具实现高性能指标的关键。

对于耐高温 O 型密封圈性能的检验,国内很多研发和制造单位,主要开展的是橡胶基材以及 O 型密封圈在常温及高温条件下的物理性能的检测,如拉伸强度、扯断伸长率、压缩永久变形、热空气老化性能等参数^[6-9],这些检测参数,虽然对 O 型密封圈的各单项技术指标进行了测评,并且在一定程度上反应了其综合性能的优劣,但这并不能表征其在特定的工程应用环境下,有很好的适应性和性能展现,即对于地层测试所面临的高温高压、高腐蚀及大温差交变等苛刻条件,一项或几项物理性能参数的高低,并不能成为使用者有效选择的明确指标。还有一些使用单位对 O 型密封圈开展了工程使用性能的检测^[10-14],但一般开展高温下承压密封性测试,这种单一的模拟试验,仍不能证明其在地层测试过程中,如大温差交变情况下的承受高压的持久性,使用者仍然没有办法掌握其在实际工况下的边界使用条件。因此,为了真正获得适用于 230 ℃、105 MPa 地层测试工具的 O 型密封圈,确保工具性能质量,制定了 O 型密封圈试验方案,设计了专用试验工具和工装,以期选择最适合地层测试作业条件的密封件,解决高温高压地层测试工具研制的卡点难题。

1 地层测试工具对耐 230 ℃ O 型密封圈的工程性能要求

对于适用于地层测试工具的 O 型密封圈,基于地层测试的具体工况和应用环境,对其工程性能主要有如下要求:①在 230 ℃ 环境温度下,能够承受 105 MPa 的静压差,并且能够保持长时间的密封性能;②能够承受一定范围的温度循环交变,并始终保持密封承压;③具备良好的抗酸腐蚀能力,在酸化作业后,仍然具备优良的密封性能;④批量生产的标准型号密封件。

对于耐高温 O 型密封圈的橡胶材质,目前公认的是氟橡胶和全氟醚橡胶^[15-17],根据诸多文献调研,氟橡胶可连续使用温度为 200 ℃,若在短时间内,对 250 ℃ 也同样具备优异的耐热性;全氟醚橡胶长期工作温度-39~288 ℃,短期可达 315 ℃。由于高温高压深井地层测试作业时间较长(一般 15~20 d),因此,考虑井底 230 ℃ 环境的长期密封可靠性,本研究主要针对氟橡胶及全氟醚橡胶材质的 O

型密封圈开展优选研究工作。

2 试验工装设计

设计的试验工装能模拟超过 230 ℃ 的环境温度,承压能力超过 105 MPa,并且能适用于多个型号的 O 型密封圈的试验。工装不受外界环境条件干扰,并且能全程自动记录试验数据。

2.1 O 型密封圈装配装置设计

由于一套地层测试工具会使用多达上百种不同尺寸型号的 O 型密封圈,为使优选结果具有可比性和代表性,分别选择了 177.8 mm 封隔器水力锚、73 mm CAS 扣以及 127 mm 安全循环阀心轴等 3 处的 O 型密封圈,分别对应尺寸型号为 2-330、2-334、2-336。为了对不同尺寸型号的 O 型密封圈开展试验,设计了一种可以适配上述三种型号 O 型密封圈的专用装配装置(见图 1)。

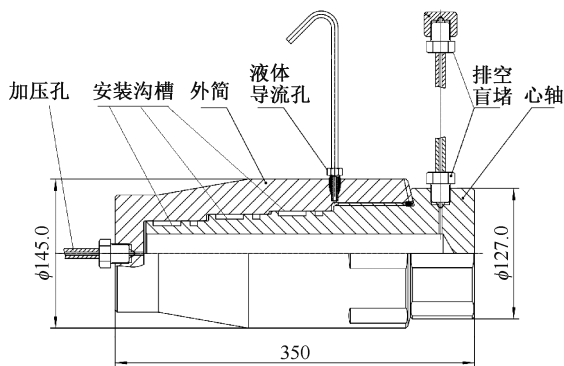


图 1 O 型密封圈装配装置

Fig. 1 "O" sealing ring assembly device

图 1 中,外筒前段装置前段有加压孔,外筒上设置液体导流孔,并配置液体导流组件,便于耐温压力试验期间观察有无液体渗出,确认密封件的完整性。心轴根据选定的三种尺寸的 O 型圈,在前端分台阶设计了三对安装沟槽,每对沟槽分别对应两种密封件安装形式(见图 2),密封圈单装形式和密封圈支撑环组合形式,尾端有排空盲堵,加压过程,可进行持续排空作业,确保试验过程中腔体内压力的稳定。

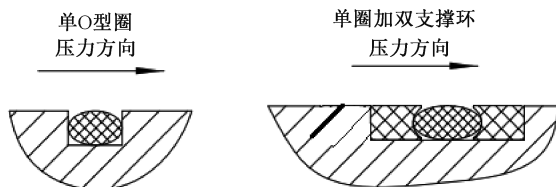


图 2 沟槽密封件安装形式

Fig. 2 Groove seal mounting form

2.2 试验工装的设计

将 2.1 中的 O 型密封圈装配装置致于高温恒温箱中,恒温箱设置为专用钢管开两个进出孔,一个孔穿越引流钢管;另一个孔穿越加压管线,并在另一端连接液压泵一提供并记录试验压力值(见图 3)。试验介质采用耐高温硅油,并采用数据采集系统分别记录试压泵压力和恒温箱内温。可实时调节 O 型圈试验压力和恒温箱内的温度,实现模拟井下环境的需求。

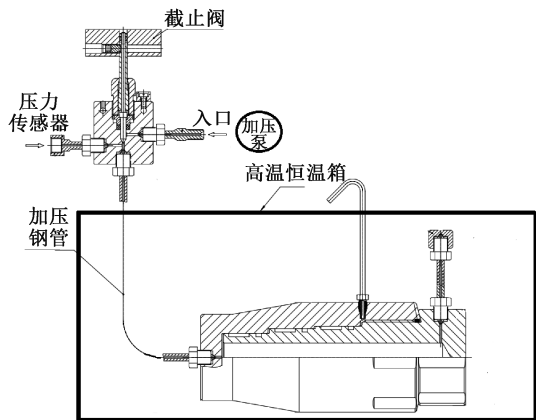


图 3 试验工装示意图
Fig. 3 Test unit diagram

3 评价试验方法设计

评价试验方法的设计以模拟现场工况为原则,参考国内外相关试验标准,确定试验参数。试验程序设计了两次升温至最高温度(230℃),一次降温至常温的温度交替过程,模拟了地层测试工具从入井到出井全过程的温度变化过程;将 O 型密封圈置于浓度 20% 的盐酸中 96 h,也远超一般酸化作业时间;高温下承压 105 MPa,稳压 48 h 小时的要求,远高于相关 API 标准中最大稳压时间 30 min 的要求,对密封持久性的评价是在充分考虑评价试验风险、成本,并且对大量测试作业中的高压差时间段的统计后,确定 48 h 是合理的评价时间。

3.1 评价试验程序

基于前述对于 O 型密封圈的工程性能的要求,设计了如下评价试验程序:

①将 O 型密封圈放置于浓度 20% 的盐酸中,静置 96 h(《GB/T 5720-2008 “O”形橡胶密封圈试验方法》)^[18];

②取出 O 型密封圈,擦拭干净,观察 O 型密封圈有无明显损坏,若无,则可装入试验装置内相应

的 O 环槽中,并安装好配套支撑环;

③在室温下,加压至额定工作压力值,稳压 15 min;

④泄压至 0,然后将试验装置加温至额定工作温度,并保持 4 h 以上;

⑤加压至额定工作压力,稳压 2 d 以上,若密封良好,继续下面的步骤;

⑥将试验装置降温至常温,并稳定 4 h 以上;

⑦加压至额定工作压力,稳压 2 h;

⑧再次泄压至 0,然后将试验装置加温至额定工作温度,并保持 12 h 以上;

⑨加压至额定工作压力,稳压 2 d 以上;

⑩降温至常温,取出 O 型密封圈观察,并拍照。

该程序基于地层测试作业常用工艺流程进行设计,其原则就是模拟现场作业过程,并对其中的关键作业点的苛刻条件进行量化刻画,以充分评价其工程适用性。如一般地层测试作业的酸化时间不会超过 12 h,但本程序在酸液中的静置时间为 96 h,这个时间是采用了《GB/T 5720-2008 O 形橡胶密封圈试验方法》中的腐蚀试验的时间要求,条件更为苛刻;耐高温承压试验部分,则是模拟了地层测试工具从工具常温条件下入井,到井底高温环境,酸化作业温度降低,后期测试温度再度上升的温度升降过程^[19-20],并且采用了从高温到常温的温度变化范围,这都大于实际作业的温度交变值。

3.2 评价试验的合格标准

对于每一个稳压试验期,压力的下降值小于 1%,温度变化范围在 $\pm 1\%$ 内为合格。由于试验工装的加压管线及液压泵等并不在恒温箱内,在进行高温承压试验期间,由于外部加压管线有热量散失,导致试压工具内压力会受温度的降低而下降,因此在试验期间,可在压降不超过 1%的情况下,进行间断补压操作,并且在此期间,引流管并无液体渗出,则试验可判定合格。

4 优选评价试验结果分析

优选评价工作分别对 3 个厂牌的氟橡胶 O 型密封圈和 10 个厂牌的全氟醚橡胶 O 型密封圈开展试验评价,所有 O 型密封圈都在 21% 的盐酸中浸泡 96 h 以后,后续全部采用单圈加双支撑环的密封组件形式,放入试验工装中,进行耐高温承压试验,为 230℃ 地层测试工具的研发打下了基础。

4.1 氟橡胶 O 型密封圈的评价试验

下表中列出了 3 个厂牌共 4 件氟橡胶 O 型密封

圈,在200℃条件下,能够承压105 MPa,但在230℃高温条件下,很难维持密封持久性,这与国内外文献中普遍认为氟橡胶可连续使用温度为200℃,若

在短时间内,对250℃也同样具备优异的耐热性的结论是符合的,因此,该类材质的O型密封圈不能满足本课题研究需求(见表1)。

表1 氟橡胶O型密封圈试验结果

Table 1 Fluorine rubber "O" sealing ring test results

序号	厂牌	O圈型号	试验温度/℃	试验结果描述
1	厂牌1	2-330	230	维持压力100~105 MPa,稳压约4 h,窜漏。
2	厂牌2	2-336	200	常温保压:最高压力105.66 MPa,无渗漏。200℃,维持压力103~106 MPa,稳压49 h,补压11次,压降0.41 MPa/h,无渗漏;49 h后压力突降,窜漏。
3	厂牌3	2-336	200	200℃,维持压力69~70 MPa,稳压5 h,发生2次压力突降。
4	厂牌3	2-330	200	200℃,维持压力104~107 MPa,稳压50 h,补压16次,压降0.65 MPa/h;常温保压:最高压力109.02 MPa,压降明显,有外漏。

4.2 全氟醚橡胶O型密封圈的评价试验

先后对国内外10个厂牌的全氟醚O型橡胶圈开展了试验评价,其中有3个厂牌的O型圈在试验

过程中表现了较好的高温承压能力和密封持久性能,表2~表4展示了前述3个厂牌各3个型号的O型密封圈的试验结果。

表2 厂牌4试验结果

Table 2 Brand 4 test results

序号	O圈型号	试验温度/℃	试验结果描述
1	2-330	230	常温加压105.66 MPa,稳压94 min。压降2.36 MPa,外观无渗漏;升温至230℃,加压至106.58 MPa,保压和补压1次,稳压约48 h,压降0.05 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压105.58 MPa,稳压2 h,压降3.92 MPa;再升温至230℃,加压106.50 MPa,稳压48 h,期间压力随气温波动。最大压力波动2.44 MPa,压降2.16 MPa,无渗漏;取出O环完好。
2	2-334	230	常温加压106.34 MPa,补压一次,无渗漏;升温至230℃,加压至108.06 MPa,稳压约48 h,压力波动0.454 MPa/h,无渗漏;降至常温,打压105.14 MPa,无渗漏;再升温至230℃,保压,稳压48 h,期间压力气温波动,最大压力波动3.04 MPa,无渗漏;取出O环完好。
3	2-336	230	常温加压105.98 MPa,稳压2 h,补压8次,无渗漏;升温至230℃,加压至106.26 MPa,补压17次,稳压43 h,压降0.76 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压107.9 MPa,微渗。再升温至230℃,加压至105.06 MPa,补压16次,稳压52.5 h,0.50 MPa/h,无渗漏;取出O环完好。

表3 厂牌5试验结果

Table 3 Brand 5 test results

序号	O圈型号	试验温度/℃	试验结果描述
1	2-330	230	常温加压105.94 MPa,压降明显;升温至230℃条件下,加压105.42 MPa,补压2次泄压1次,稳压48 h,压降0.046 MPa/h,无渗漏;再降至常温,加压105.3 MPa,压降明显;再升温至230℃条件下,加压106.86 MPa,外观无渗漏;取出观察,O圈轻微变形。
2	2-334	230	常温加压105.2 MPa,压降明显;230℃条件下,加压104.94 MPa,补压12次,稳压45 h,压降0.53 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压106.62 MPa,压降明显;再升温至230℃,加压至105.82 MPa,补压10次,稳压48 h,压降0.47 MPa/h,无渗漏。
3	2-336	230	常温加压105.46 MPa,压降明显;230℃条件下,加压106.9 MPa,补压1次,稳压48 h,压降0.074 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压105.31 MPa,压降明显;再升温至230℃,加压105.74 MPa,稳压48 h,压降0.114 MPa/h,无渗漏;取出观察,O圈轻微变形。

表4 厂牌6试验结果

Table 4 Brand 6 test results

序号	O圈型号	试验温度/℃	试验结果描述
1	2-330	230	升温至230℃,加压106.09 MPa,补压1次,稳压48 h,压降0.03 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压105.18,压降明显;再升温至230℃,加压至106.62 MPa,稳压48 h,压降0.04 MPa/h,无渗漏。
2	2-334	230	常温加压71.74 MPa,压降明显;升温至230℃条件下,加压至104.94 MPa,补压7次,稳压48 h,压降0.315 MPa/h,无渗漏。降至常温,加压69.58 MPa,压降明显;再升温至230℃,加压至105.72 MPa,补压1次,稳压48 h,无渗漏。
3	2-336	230	升温至230℃,加压至107.14 MPa,补压2次,稳压约48 h,压降0.12 MPa/h,无渗漏;降至常温,加压至71.34 MPa,压降明显;再升温至230℃条件下,加压至106.02 MPa,稳压48.5 h,期间压力随气温波动。最大压力波动1.68 MPa,压降0.06 MPa/h,外观无渗漏。

上述试验过程中,因为加压管线并不在恒温装置内,试验期间外部加压管线温度低,导致装置内部压力有缓降趋势,但装置并无泄漏发生,表明承压合格。另外对比了上述3种厂牌的O型密封圈的橡胶材料的物理性能进行对比(见表5),其各自的抗拉强度、热空气老化后强度等参数,各有高低,没有呈现明显的相关性规律,再一次证明本研究通过工程模拟试验来进行材料优选的实用价值。由于全氟醚橡胶的硬度较高,在冬季室温下的承压能力表现不是很好,在高压下一般都有微渗,但在夏季气温超过30℃以后,常温试验都能达到105 MPa承压能力,因此在选择该类密封圈时,要考虑现场作业的最大温度变化范围。

表5 物理性能参数对比

Table 5 Comparison of physical performance parameters

O 圈 型号	拉断 强度/ MPa	拉断伸 长率/ %	拉花硬 度变化/ %	老化拉断 强度变化/ %	老化拉断 伸长率/ %
厂牌4	19.28	132	1	-10	10
厂牌5	20.76	147	-1	5	-4
厂牌6	25.50	117	2	-13	-13

5 结论

(1)通过评价试验,确定了全氟醚橡胶是满足工具开发需求的选材方向,优选出了3种具有较好的高温承压能力和密封持久性能的密封圈,在浓度20%的盐酸中浸泡96 h以后,经历两次升温至230℃,一次降温至常温的温度交变过程中,都能反复承受长达48 h的高压(105 MPa)密封测试。

(2)在评价试验过程中,一定要严格执行温度交变过程,并且确保试验工装工作稳定性,才可以在苛刻的条件下,筛选出性能优异的产品。

(3)本研究是基于标准密封件开展的试验,但是工具设计过程中,不同的部位可能采用不同的沟槽设计,也可能影响工具的整体密封性能,工具开发人员的设计要确保合适的压缩率和槽宽,以充分发挥密封件的性能。

致谢:感谢川庆钻探工程有限公司试修公司同意本文发表。

参考文献

[1] 贺秋云,韩雄,曾小军. 高温高压井下测试工具橡胶密封材料的优选[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.
[2] 张瑞,李奔,冯丽莹,等. 四丙氟橡胶在含 H₂S 和 CO₂ 酸性环境中的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护,2018,39(8):582-586.
ZHANG Rui, LI Ping, FENG Liying, et al. Corrosion resistance of tetrafluoroethylene-propylene rubber in H₂S/CO₂ acidic environment[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(8):582-586.
[3] 张文禹, Martin Hoch. 硫化氢对氢化丁腈橡胶性能的影响[J]. 世界橡胶工业,2015,42(1):7-11.
ZHANG Wenyu, Martin Hoch. Effect of H₂S on the properties of HNBR[J]. World Rubber Industry, 2015, 42(1):7-11.
[4] 潘登,王东林,黄靖富,等. 高温高压深井地层测试工具低频率失效案例解析[J]. 钻采工艺,2023,46(2):165-169.
PAN Deng, WANG Donglin, HUANG Jingfu, et al. Case analysis of DST tools low-frequency failures in HTHP deep well[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(2):165-169.
[5] 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 down hole tools in the process of well testing and completion in natural gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(6):59-64.
[6] 杨盼奎,陈冬梅,张超等. O形橡胶密封圈性能预测与实验研究进展[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2017,38(S2):47-51.
YANG Pankui, CHEN Dongmei, ZHANG Chao, et al. Performance prediction and experimental research progress of rubber O-ring[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 38(S2):47-51.
[7] 丛川波,欧阳江林,周琼. 高温硫化氢环境下四丙氟橡胶老化机理的研究[C]//中国化学会高分子学科委员会. 2011年全国高分子学术论文报告会论文摘要集. 中国石油大学(北京)理学院材料系,2011:1.
CONG Chuanbo, OUYANG Jianglin, ZHOU Qiong. Study on aging mechanism of tetrapropyl fluoro rubber under high temperature hydrogen sulfide environment[C]//Polymer Science Committee of the Chinese Chemical Society. 2011 National Polymer Academic Paper Report. Department of Materials, College of Science, China University of Petroleum(Beijing), 2011:1.
[8] 齐效文,范海涛,许洋. 非金属密封件材料浸渍试验技术研究[J]. 化工管理,2021(6):75-76.
QI Xiaowen, FAN Haitao, XU Yang. Immersion testing technology of non-metallic sealing materials[J]. Chemical

- Engineering Management, 2021(6):75-76.
- [9] 张昱旻. 国内外氟醚橡胶混炼胶性能对比研究[J]. 特种橡胶制品, 2017, 38(3):27-31.
ZHANG Yumin. Comparative study on properties of fluorane rubber compound at home and abroad[J]. Special Purpose Rubber Products, 2017, 38(3):27-31.
- [10] 庞东晓, 王志敏, 潘登等. 井下工具高温高压实验装置研制[J]. 油气井测试, 2017, 26(4):45-48.
PANG Dongxiao, WANG Zhimin, PAN Deng, et al. Development of high temperature and high pressure experimental device for down-hole tool[J]. Well Testing, 2017, 26(4):45-48.
- [11] 李少龙, 李珍莲, 董红莉. 航空发动机耐高温橡胶密封圈性能试验研究[J]. 航空标准化与质量, 2019(2):19-23.
LI Shaolong, LI Zhenlian, DONG Hongli. Study on performance test of Aero-engine high temperature resisting rubber sealing gasket[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2019(2):19-23.
- [12] 王锦昌, 邓学峰, 曾德智, 等. 模拟井筒工况下四丙氟橡胶 O 型圈腐蚀损伤研究[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(4):77-82.
WANG Jinchang, DENG Xuefeng, ZENG Dezhi, et al. Corrosion mechanism of tetrafluoroethylene-propylene rubber O-ring in simulated wellbore condition [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47(4):77-82.
- [13] 李强, 李文涛, 邹思源, 等. 钻完井工具橡胶密封件材料优选[J]. 石化技术, 2021, 28(7):35-36.
LI Qiang, LI Wentao, ZOU Siyuan, et al. Optimization of rubber seal materials for drilling and completion tools[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(7):35-36.
- [14] 吕祥奎, 黄灏, 黄晓明, 等. 耐压闸门密封圈泄漏率预测的理论与实验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7):51-55.
LYU Xiangkui, HUANG Hao, HUANG Xiaoming, et al. Theoretical and experimental study of the leakage prediction of the rubber sealing structure for pressure gate[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(7):51-55.
- [15] 董雅卓, 冀克俭, 侯倩倩, 等. 氟醚橡胶研究及应用进展[J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(3):240-244.
DONG Yazhuo, JI Kejian, HOU Qianqian, et al. Research and application development of fluoroether rubber [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(3):240-244.
- [16] 杨家义, 孔建, 李振环, 等. 全氟醚橡胶 O 型圈在旋转接头上的应用研究[J]. 流体机械, 2011, 39(6):10-12.
YANG Jiayi, KONG Jian, LI Zhenhuan, et al. Study and application of perfluoroelastomers O-ring for rotary joint [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(6):10-12.
- [17] 高燕, 向宇. 全氟醚橡胶及其制品在密封行业的应用[J]. 汽车零部件, 2015(6):59-63.
GAO Yan, XIANG Yu. Application of FFKM and Its Products in the Sealing Industry [J]. Automobile Parts, 2015(6):59-63.
- [18] 高静茹, 沈振, 曹元礼. O 形橡胶密封圈试验方法: GB/T 5720-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008:1.
GAO Jingru, SHEN Zhen, CAO Yuanli. Test methods for rubber O-rings: GB/T 5720-2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2008:1.
- [19] 潘登, 谢胜, 舒梅, 等. 复杂深井地层测试的难点及管柱结构的应对策略[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4):63-67.
PAN Den, XIE Sheng, SHU Mei, et al. Difficulties in formation testing of complex deep wells and strategy for string structure [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4):63-67.
- [20] 潘登, 刘兴华, 胡长翠, 等. 射孔测试联作工艺技术在川渝高含 H₂S 气井的应用[J]. 油气井测试, 2007, 16(1):42-43.
PAN Den, LIU Xinghua, HU Changcui, et al. Application of perforation and test integration technology in wells with high H₂S content in Sichuan and Chongqing region [J]. Well Testing, 2007, 16(1):42-43.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:潘登,男,1976年出生,高级工程师,1998年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,一直致力于地层测试技术、装备的研究及应用工作。电话:028-86017062, Email: pandeng_sc@cnpc.com.cn。通信地址:四川省成都市成华区华泰路越盛能源大厦川庆钻探工程有限公司试修公司, 邮政编码:610052。