

开式抽汲排液中 P-T 封隔器失封原因分析

肖志永

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email: xiaozhiyong@petrochina.com.cn

项目支持: 中国石油集团(股份)公司科研项目“大庆油田致密油层压裂技术攻关及现场试验”(110014318)

引用:肖志永. 开式抽汲排液中 P-T 封隔器失封原因分析[J]. 油气井测试, 2021, 30(5): 18-22.

Cite: XIAO Zhiyong. Analysis of failure causes of P-T packer in open swabbing and drainage [J]. Well Testing, 2021, 30(5): 18-22.

摘要 当开式抽汲管柱上顶力不足时,会因活塞效应增加密封端面脱离密封唇的几率而导致 P-T 封隔器失封。在杏 X-X 井开式抽汲过程中, P-T 封隔器失封,压力监测曲线表现出压力突降至某一数值后不再降低。经分析认为,封隔器上部液体被抽空情况下,抽汲动作所产生的活塞效应是引起失封的直接原因。通过增加机械锁紧装置、增加管柱配重、预留合理方余及监测产量变化等改进措施,下封隔器压力监测显示, P-T 封隔器密封良好,作业成功。该分析结果可为开式抽汲排液提供一定的技术借鉴。

关键词 试油; 开式抽汲; 排液; P-T 封隔器; 失封原因; 压力监测; 活塞效应; 产量

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2021. 05. 003

Analysis of failure causes of P-T packer in open swabbing and drainage

XIAO Zhiyong

Oil Testing and Production Test Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: When the upward force of the open swabbing pipe string is insufficient, the piston effect will increase the risk of the sealing face detaching from the sealing lip, which will lead to the failure of the P-T packer. During the open swabbing process of Well Xing X-X, the P-T packer failed. At the meantime, the pressure monitoring curve showed that the pressure suddenly dropped to a certain value and did not continue to decrease. After analysis, it is believed that the piston effect produced by the swabbing action is the direct cause of the packer's failure when the liquid above the packer is evacuated. After applying improvement measures such as adding mechanical locking devices, increasing pipe string counterweights, reserving reasonable surplus and monitoring production changes, the pressure monitoring results showed that the P-T packer has achieved a good sealing effect and the operation was successful. The analysis results can provide technical reference for open swabbing and drainage.

Keywords: oil testing; open swabbing; drainage; P-T packer; failure cause of packer; pressure monitoring; piston effect; production

P-T 封隔器是美国江斯顿公司生产的一种封隔器, 全称 Posi-Test Packer^[1]。P-T 封隔器由于其结构简单、操作实用, 在大庆油田的试油作业中, 得到广泛的使用^[2-3]。但其独特的旁通结构使其容易出现密封端面泄压失封, 造成作业失败^[4-5]。油管带 P-T 封隔器的开式抽汲方式, 通过封隔下部已试层段, 对上部待试层段进行抽汲^[6-7]。油管抽汲时, 封隔器上部油套管液面随抽汲动作同步升、降, 压力也同步升、降^[8-9]。抽汲排空, 使封隔器上部处于“真空”状态^[10]; 定周期抽汲求产时, 封隔器下部始终处于“憋压”状态, 而抽汲动作会产生活塞效应, 引起管柱微小的收缩^[11-13], 管柱带动封隔器芯轴, 芯轴带动密封端面瞬间脱离密封唇, 造成泄压

失封^[14-15]。

1 结构特点和工作机理

P-T 封隔器是 Y221 封隔器的一种, 属于旋转加压坐封悬挂式封隔器^[16]。它主要由旁通、密封元件、卡瓦总成组成。

封隔器下井时, 凸耳位于自动槽的短槽之中, 摩擦垫块始终与套管内壁紧贴, 胶筒处于自由状态, 旁通是打开的。当封隔器下至预定井深时, 先要上提管柱, 使凸耳在短槽的下部位置, 再右旋管柱 1~3 圈, 在保持扭矩的同时, 下放管柱加压缩负荷。由于管柱旋转, 凸耳到长槽内, 加压时坐封心轴向下移动, 端面密封与密封唇吻合而关闭旁通

道。继续加压,锥体下行把卡瓦胀开,卡瓦上的合金块的棱角嵌入套管壁,胶筒受压而膨胀,紧贴在套管壁上,形成密封。解封只需施加拉伸负荷,先将端面密封拉开,旁通道打开,胶筒上、下压力平衡,再继续上提,胶筒卸掉压力而复原。此时,凸耳从长槽沿斜面自动回到短槽内,锥体上行,卡瓦随之收回,封隔器解封。

P-T 封隔器的旁通是关键的组成部分,它有较大的旁通面积,能够连通起下管柱的井内液体,即在起下管柱遇到缩径井段时,流体可以从管柱内部经旁通过,减少起下管柱阻力和抽汲作用;施工结束时,平衡封隔器上、下方压力,便于解封。但旁通的存在易导致密封端面泄压。P-T 封隔器坐封前,旁通处于打开状态,封隔器胶筒上下连通,上、下方压力平衡;坐封后,通过端面密封与密封唇两者的吻合实现旁通关闭。如果端面密封与密封唇密封性不好,旁通关闭效果差,相当于封隔器上下仍然连通,即使胶筒密封效果再好,封隔器也起不到封隔胶筒上下地层的目的,地层之间势必会进行相互干扰。密封端面泄压较之胶筒失封的几率更大。所以,在现场施工时,要尽量避免因 P-T 封隔器密封端面的破坏而造成的泄压。

2 密封端面泄压理论分析

P-T 封隔器旁通是通过“端面密封”实现关闭的,而端面密封与密封唇二者要想形成密封,需要一定作用力的挤压,P-T 封隔器密封端面力学分析如图 1 所示。

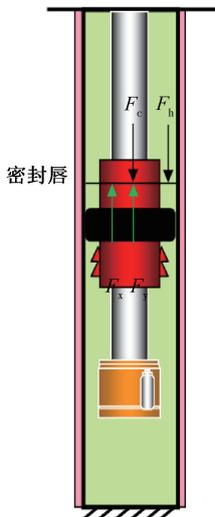


图 1 P-T 封隔器密封端面力学分析图

Fig. 1 Mechanical analysis diagram of sealing face of P-T packer

2.1 环空液柱作用力

上方环空液柱压力作用在封隔器芯轴上,方向向下。其对封隔器心轴有效向下作用面积有两种情况:一是 P-T 封隔器上方油管和油套环空是连通的(开式抽汲、双封排液等),有效面积为油管内径处面积;二是 P-T 封隔器上方油管和油套环空是非连通的,有效面积为油管内径处面积与端面密封环外径之间的环形面积,φ139.7 mm P-T 封隔器密封环外径为 80 mm。因此,环空液柱作用力为

$$F_h = p_h A_h \quad (1)$$

式中: F_h 为环空液柱对封隔器旁通向下作用力,kN; p_h 为环空液柱压力,MPa; A_h 为环空液柱压力对封隔器旁通有效向下作用面积,cm²。

2.2 下部井筒液体作用力

下部井筒液体压力 p_x 作用在封隔器芯轴上,方向向上。其对封隔器芯轴及整个管柱有效向上作用面积是密封唇接头最大内径处面积,φ139.7 mm P-T 封隔器密封唇接头最大内径为 70 mm。因此,下部井筒液体作用力为

$$F_x = p_x A_x \quad (2)$$

式中: F_x 为下部井筒液体对封隔器旁通向上作用力,kN; p_x 为下部井筒液体压力,MPa; A_x 为下部井筒液体压力对封隔器旁通有效向上作用面积,cm²。

2.3 有效坐封载荷

管柱的松弛载荷(地面指重表下降的载荷)是不可能完全作用在封隔器上面。因为管柱在井筒内会产生螺旋弯曲现象,一部分松弛载荷消耗在套管壁上,压在封隔器上的载荷就是有效坐封载荷。根据国内外的参考资料进行整理,得出了有效坐封载荷的近似图版(大庆油田试油井基本采用 φ139.7 mm 油层套管完井,φ73 mm 油管排液),如图 2 所示。

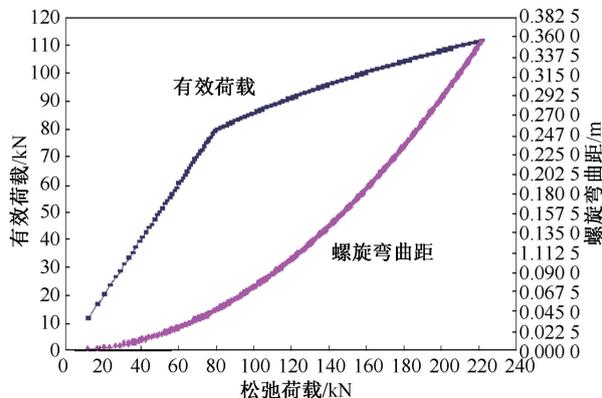


图 2 P-T 封隔器有效坐封载荷图版

Fig. 2 The effective setting load chart of P-T packer

2.4 操作提升力

将由于人为因素而对封隔器产生的向上的作用力统称为操作提升力。操作提升力抵消了一部分的管柱载荷。其产生的原因很多。比如,在 MFE 测试开关井上提管柱时,就可能将管柱的部分载荷提起,有效载荷减少;抽汲排液时,抽子胶筒与油管壁之间产生的摩擦力也是一种操作提升力。

有效坐封载荷 F_y 和环空液柱作用力 F_h 试图关闭旁通端面,下部井筒液体作用力 F_x 和操作提升力 F_c 总是企图打开旁通端面。只有环空液柱作用力与有效坐封载荷的合力大于下部井筒液体作用力与操作提升力的合力时,才能保持关闭,即

$$(F_y + F_h) \geq (F_x + F_c) / 10 \quad (3)$$

其中 $F_x = p_x A_x / 10$, $F_h = p_h A_h / 10$

式中: F_y 为加在封隔器上的有效坐封载荷, kN; F_c 为操作提升力, kN。

但是,上面只是对封隔器上下作用力的大小做了比较,忽略了压力变化对管柱长度的影响。因油管柱内、外压力作用在管柱直径变化处和密封管的端面上引起封隔器管柱受力和长度变化的一种效应,为活塞效应。对 P-T 封隔器,只考虑环空液柱作用力 F_h 和下部井筒液体压力 F_x 。

引起活塞效应的力称为活塞力,规定向上作用的力(压缩力)为正,向下作用的力(张力)为负,即

$$F_{\text{活}} = F_h + F_x = p_x A_x - p_h A_h \quad (4)$$

则压力变化引起活塞力的变化为

$$\Delta F_{\text{活}} = (\Delta p_x A_x - \Delta p_h A_h) / 10 \quad (5)$$

式中: $\Delta F_{\text{活}}$ 为活塞力的变化量, kN; Δp_h 为上方环空液柱压力变化量, MPa; Δp_x 为下部井筒液体压力变化量, MPa。

根据胡克定律,活塞力的变化会引起封隔器管柱长度的变化,即

$$\Delta L = (\Delta F_{\text{活}} L) / (E A_s) \times 10^3 \quad (6)$$

式中: L 为管柱长度, km; E 为管柱材料弹性模量(钢的值为 2.058×10^4), kN/cm²; A_s 为管柱横截面积($\phi 73$ mm EUE 油管值为 11.69), cm²; ΔL 为封隔器管柱长度变化量, cm。

即使 $(F_y + F_h) \geq (F_x + F_c)$ 没有绝对成立,即在封隔器下部压力小于但接近上部压力的情况下,封隔器芯轴活塞力突然的变化,且作用方向向上(压缩力),势必会引起管柱微小的收缩,管柱带动封隔器芯轴,芯轴带动密封端面瞬间脱离密封唇,造成泄压。所以,在上顶力不足时,活塞效应大大增加

了密封端面脱离密封唇的几率,也会导致失封。

3 封隔器失封分析

开式抽汲是油套管连通的一种抽汲排液方式,适用于出砂多、跨距大的情况^[17]。油管带封隔器,通过封隔下部已试层段,对上部待试层段进行抽汲。油管抽汲时,封隔器上部油套管液面升、降同步,压力也随着抽汲动作的进行在周而复始的升、降。定抽汲周期前,进行抽汲排空,即将封隔器上部油套管里的液体全部排干净,造成上方环空液柱压力极小,封隔器上部处于“真空”状态,压力落差太大;定周期抽汲求产时,相同产量下,由于环空截面积远大于油管截面积,液面恢复高度低,产生的压力必然少,抽汲动作会产生活塞效应。而封隔器下部始终处于“憋压”状态,类似于不压井或半压井作业,可能就会出现封隔器失封现象。

对于开式抽汲,上方环空液柱压力 p_h 对应的有效向下作用面积 A_h 为油管内径处面积, $\phi 73$ mm EUE 油管内径为 62 mm,则

$$A_h = \pi \times 6.2 \times 6.2 / 4 = 30.19 \text{ cm}^2$$

下部井筒液体压力 p_x 对应的有效向上作用面积密封唇接头最大内径处面积,为 80 mm,则

$$A_x = \pi \times 8.0 \times 8.0 / 4 = 50.26 \text{ cm}^2$$

杏 X-X 井,第 S2-1 层:F31、F24 号层,井段 1 734.2~1 647.6 m,有效厚度 9.0 m。本井 YD-89 III 枪装 DP41RDX-1 型弹射孔,压裂后采用 P-T 封隔器开式抽汲求产方式,抽汲排空,历时 810 min,出水 76.4 m³,1 720.0 m 处定时、定深抽汲,共抽汲 64 个周期,出油 26.39 m³,出水 20.23 m³。图 3 为压力监测曲线。

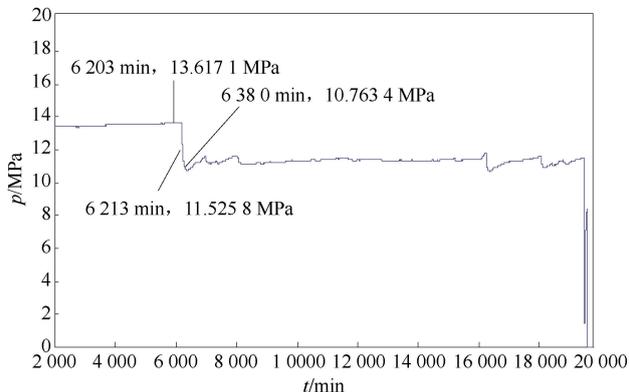


图 3 杏 X-X 井压力监测曲线

Fig. 3 Monitoring pressure curve of Well Xing X-X

本层下部已存在试油层,由于 S2-1 层井段为 1 734.2~1 647.6 m,厚度 86.6 m。若用剪销封隔器

+P-T 封隔器闭式排液工艺,则需要将近 100 m 的跨距,失败率很高。所以,采用 P-T 封隔器开式抽汲排液的方法,封隔器卡点 1 743.86 m。

在排液 6 203 min 时,压力由 13.617 1 MPa 快速下降至 11.525 8 MPa,最后降到 10.763 4 MPa,停止下降。之后的监测中,出现的压力波动,幅度较小。通过与层内压力曲线对比,6 203 min 恰好处第 19 抽汲周期抽汲胶筒上行阶段,层内压力即环空液柱压力 p_h 由于管柱内液体被抽出,由 1.502 3 MPa 突降至 0.950 9 MPa。由此可以计算出在 6 203 min 时各作用力的大小。

环空液柱作用力:

$$F_h = p_h A_h = 0.9509 \times 30.19 / 10 = 2.87 \text{ (kN)}$$

下部井筒液体压力:

$$F_x = p_x A_x = 13.6171 \times 50.26 / 10 = 68.44 \text{ (kN)}$$

现场操作管柱的松弛载荷为 80 kN。根据图版,加在封隔器上的有效坐封载荷大约 75 kN,即 $F_y = 75 \text{ kN}$ 。则封隔器处下压作用力如下,即

$$F_y + F_h = 75 + 2.87 = 77.87 \text{ (kN)}$$

封隔器处上顶作用力为 $F_x = 68.44 \text{ kN}$ 。数值上对比可以发现,上顶力比下压力稍小。但压在封隔器上的作用力只有 $77.87 - 68.44 = 9.43 \text{ (kN)}$,相当于有效载荷只有 9.43 kN,封隔器具有失封的趋势。

同时,现场回收胶筒的边缘磨损严重,且携有少许的压裂砂,每抽子需换一组胶筒。由此考虑,抽子胶筒上行与油管壁的摩擦力也较大,必然更加削弱 9.43 kN 的有效载荷,密封端面很容易脱离密封唇。

抽汲胶筒下到预定深度,上提的一瞬间,封隔器芯轴活塞力变化如下,即

$$\Delta F_{活} = (\Delta p_x A_x - \Delta p_h A_h) / 10 = \Delta p_h A_h = 1.8 \text{ kN}$$

封隔器管柱长度瞬间缩短,即

$$\Delta L = (\Delta F_{活} L) / (EA_s) \times 10^3 = 1.27 \text{ cm}$$

在抽汲胶筒上提前后,1.8 kN 的活塞力方向向上,该力将使整个管柱瞬间缩短而上移 1.27 cm,从而使封隔器芯轴带动密封端面脱离密封唇,造成瞬间失封。与此同时,由于封隔器胶筒与密封端面处于同一受力环境中,只是受力面积稍有差异,封隔器胶筒也受到活塞力的作用,使封隔器胶筒上移,帮助密封端面与密封唇重新接触密封。但其上移速度要滞后于封隔器芯轴带动密封端面上移的速度,产生先失封后密封的现象。表现在压力曲线上就是,压力突降至某一数值后不再降低。

同时发现,在之后的抽汲过程中,随着抽汲上提的每一次动作,监测压力都会同步的降低,然后再随液面恢复而上升。这就更说明,在开式抽汲封隔器上部液体被抽的情况下,抽汲动作所产生的活塞效应是引起失封的直接原因。

在封隔器上部加机械锁紧装置或采用双向卡瓦封隔器;在井筒口袋允许的条件下,在封隔器下方增加配重油管或钻杆,在封隔器上部加机械锁紧装置,下方增加配重油管。图 4 为杏 X-X 井改进后管柱结构示意图。

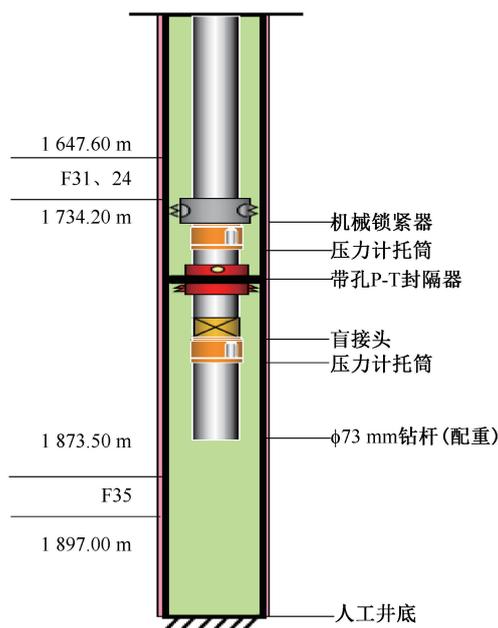


图 4 杏 X-X 井改进后管柱结构示意图

Fig. 4 Optimized pipe string structure of Well Xing X-X

抽汲过程中,用井口封井器或防喷器半封卡住油管,或者在井口油管上装油管挂,坐于油管头内,上好顶丝,防止管柱随抽汲动作蠕动。下井前,必须检查封隔器密封端面、密封唇是否破损或二者的吻合状态,防止由于封隔器本身存在问题造成失封;封隔器坐封时,留好方余,使坐封吨位足够,能够压得住封隔器。抽汲求产,准确计量油、水产量,根据产量的变化,可以尽早判断封隔器是否失封,以便及时处理。

4 结论

(1) 通过对 P-T 封隔器密封端面泄压理论计算分析得出,当管柱上顶力不足时,会因活塞效应增加密封端面脱离密封唇的几率而导致失封。

(2) 在杏 X-X 井开式抽汲过程中,通过分析压力监测曲线得出,封隔器上部液体被抽空情况下,抽汲

动作所产生的活塞效应是引起失封的直接原因。

(3)通过增加机械锁紧装置、增加管柱配重、预留合理方余及监测产量变化等方面改进措施,成功完成杏X-X井开式抽汲作业,为开式抽汲排液提供一定的技术支持。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本文公开发表;感谢施工队伍在本文现场试验数据统计分析中给予的大力支持;感谢试油试采分公司试油大队给予的相关指导。

参考文献

- [1] 沈琛. 试油测试工程监督[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:233-235.
- [2] 刘清友,王国荣,湛精华. 井下封隔器工作行为仿真[M]. 北京:石油工业出版社,2010:122-126.
- [3] 尹丽生,潘兆先,李士勇,等. JS-2封隔器现场应用[J]. 油气井测试,2010,19(2):58-59.
YIN Lisheng, PAN Zhaoxian, LI Shiyong, et al. Field application of JS-2 model packer [J]. Well Testing, 2010, 19(2):58-59.
- [4] 孙士东,夏仲诗. 排液封隔器失封原因及解决方法[J]. 油气井测试,2016,25(2):67-68.
SUN Shidong, XIA Zhongshi. Seal failure cause of drain packer and its solution [J]. Well Testing, 2016,25(2):67-68.
- [5] 贺立新. 试油求产排液常见问题及对策研究[J]. 吐哈油气,2010,15(4):335-338.
HE Lixin. Problems and Countermeasures for well testing and production [J]. Tuha Oil & Gas, 2010,15(4):335-338.
- [6] 孙永涛,马魁魁,陆爱华. 浅海试油排液工艺的对比及优选[J]. 油气井测试,2010,19(3):33-35.
SUN Yongtao, MA Kuikui, LU Aihua. Comparison and optimization of oil test tech at shallow sea [J]. Well Testing, 2010,19(3):33-35.
- [7] 王瑞滨. 大庆油田大斜度井试油工艺[J]. 油气井测试,2019,28(3):31-36.
WANG Ruibin. Oil testing technology for highly deviated wells in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(3):31-36.
- [8] 李民乐,夏克文,王建国,等. 地层测试三开抽汲若干问题探讨[J]. 油气井测试,2016,25(4):36-37.
LI Minle, XIA Kewen, WANG Jianguo, et al. Discuss on several issues about three open swabbing of well test [J]. Well Testing, 2016,25(4):36-37.
- [9] 高文祥,贾宝贵,张安治,等. 封隔器性能信封曲线[J]. 油气井测试,2017,26(5):31-33.
GAO Wenxiang, JIA Baogui, ZHANG Zhi'an, et al. Envelope curve of packer property [J]. Well Testing, 2017,26(5):31-33.
- [10] 郭飞,黄毅杰,宋炜,等. 封隔器胶筒力学仿真模型的建立[J]. 润滑与密封,2020,45(6):22-27.
GUO Fei, HUANG Yijie, et al. Establishment of mechanical simulation model for packer rubber [J]. Lubrication Engineering, 2020,45(6):22-27.
- [11] 练章华,乐彬,宋周成,等. 封隔器坐封过程有限元模拟分析[J]. 石油机械,2007,35(9):19-21,41.
LIAN Zhanghua, YUE Bin, SONG Zhoucheng, et al. Finite-element simulation analysis of the setting process of packer [J]. China Petroleum Machinery, 2007,35(9):19-21.
- [12] 张智,王波,李中,等. 高压气井多封隔器完井管柱力学研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(6):172-178.
ZHANG Zhi, WANG Bo, LI Zhong, et al. Mechanical study of completion string with multi-packer for high pressure gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(6):172-178.
- [13] 周生福,崔龙兵,刘练,等. 顺北油田三高油气井完井测试封隔器影响因素及对策[J]. 油气井测试,2019,28(3):37-41.
ZHOU Shengfu, CUI Longbing, LIU Lian, et al. Influencing factors of completion test packer and countermeasure for 3-high oil and gas well in Shunbei Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(3):37-41.
- [14] 陈少奇,罗毅,邱枫,等. 压缩式封隔器接触力学行为及坐封效果评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2019,34(4):82-88.
CHEN Shaoqi, LUO Yi, et al. Contact mechanics behavior and sealing effect evaluation of compressed packer [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019,34(4):82-88.
- [15] 尤长国,孔德福,李志文. 卡瓦封隔器在套管井中不坐封原因浅析[J]. 油气井测试,2005,14(2):48-49.
YOU Changguo, KONG Defu, LI Zhiwen. A brief analysis for setting problems of slip-type packer in cased well [J]. Well Testing, 2005,14(2):48-49.
- [16] 刘标,龙小泳,魏长霖,等. Y221型封隔器解卡技术分析与应用[J]. 中国石油石化,2017(9):54-55.
LIU Biao, LONG Xiaoyong, WEI Changlin, et al. Analysis and application of the technique of stripping card of Y221 packer [J]. China Petrochem, 2017(9):54-55.
- [17] 徐健. 浅层试油气工艺技术在临江区块的应用[J]. 油气井测试,2012,21(6):46-48,52.
XU Jian. Application of oil and gas production testing technology for shallow layer in the Linjiang block [J]. Well Testing, 2012,21(6):46-48,52.

编辑 王军

第一作者简介:肖志永,男,1984年12月出生,工程师,2008年毕业于西南石油大学石油工程专业,现主要从事油气测试技术等工作。电话:0459-5691644,13766784402;Email:xiaozhiyong@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街试油试采分公司,邮政编码:163412。