

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020044

高温深层碳酸盐岩裸眼酸压完井 封隔器研制与现场试验

刘 阳

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 针对塔北深层奥陶系油藏裸眼完井过程中封隔器胶筒易老化、骨架易破损的问题,进行了故障原因分析,设计了柔性锚瓦结构,以保护钢骨架,防止大扩张比、高承压状态下钢骨架变形过大造成的胶筒破坏;在保持氟橡胶(FKM)优异耐老化性能的基础上进行了改性,提高其塑性和热稳定性,使其更容易在模具中注胶和成型;坐封机构进液通道设计了可投球激活的保护滑套,可以避免钻井液沉淀堵塞。改进后的裸眼封隔器耐温达180℃,封隔能力强,适用于不规则裸眼地层的长期密封。塔北哈拉哈塘作业区4口井应用了改进后的裸眼完井封隔器,封隔器下入顺利,坐封显示明显,大规模酸压施工及求产过程中套压无异常。研究表明,改进后的封隔器满足完井-酸压-求产一体化工艺需求,解决了塔里木盆地深层油气开发存在的问题,具有较好的推广应用价值。

关键词: 碳酸盐岩; 高温; 高压; 酸压; 裸眼封隔器; 柔性锚瓦; 扩张式胶筒

中图分类号: TE925⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)06-0076-06

The Development and Field Testing of a High-Temperature Deep-Layer Open Hole Packer for Acid Fracturing Completion in Deep Carbonate Reservoirs

LIU Yang

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Premature aging of packer rubber elements and damage-prone of packer skeletons during the open hole well completions have been a problem in the deep Ordovician reservoirs of Northern Tarim Basin. To solve this, the causes of failures have been analyzed, after which a flexible anchor slip structure was designed for the protection of steel skeleton and prevention of damage to the rubber element caused by the excessive deformation of steel skeleton under large expansion ratio and high pressure. While maintaining the excellent aging resistance of fluororubber, plasticizing modification technology was used to improve its plasticity and thermal stability, which would make it easier to be moulded through mold injection. For the fluid inlet channel of the setting mechanism, a ball-activated protective sliding sleeve was designed to avoid the settling and clogging of drilling fluid. The improved open hole packer had a temperature resistance of 180℃ and strong sealing capacity, which was suitable for long-term sealing of irregular open hole formations. When applying such improved open hole completion packer in 4 wells in the Halahatang Area of Northern Tarim Basin, the RIH was smooth, the setting sign was obvious, and there was no abnormal casing pressure during the large-scale acid fracturing and production process. Research results showed that the improved packer met the needs of the integration of completion, acid fracturing and production testing, solved problems of deep oil and gas development in Tarim Basin, and had a good value for popularization and application.

Key words: carbonate; high temperature; high pressure; acid fracturing; open hole packer; flexible anchor; inflatable element

塔北深层碳酸盐岩区块具有超深、高温和高压的特点,完井试油时经常会遇到泥质灰岩或灰质泥岩层构成的次级断裂带,通常先采用带有重叠钢骨架的扩张式封隔器对上覆裸眼地层进行封隔,然后对下部产层进行定点酸压改造,改造后封隔器不解封,直接转产^[1-5]。例如,金跃、跃满区块的储层平

收稿日期: 2019-07-09; 改回日期: 2020-04-20。

作者简介: 刘阳(1985—),男,山东淄博人,2007年毕业于河北理工大学机械制造及自动化专业,2010年获山东大学机械制造及自动化专业硕士学位,副研究员,主要从事套管、裸眼封隔器类完井工具与材料研究。E-mail: liuyang.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“顺北一区完井技术研究与应用”(编号:P18022)资助。

均埋深超过 7 000.00 m, 压力系数 1.20, 地层温度超过 160 ℃, 泥岩段井径扩大率普遍超过 8.0%, 裸眼段长 100.00~600.00 m, 酸压至转产期间, 裸眼封隔器受完井管柱屈曲、温度及鼓胀等多种诱发力作用, 现有耐温 160 ℃、承压 50 MPa 的裸眼封隔器在使用过程中存在因钢骨架变形大无法坐封和高温老化失封的问题, 难以满足试油要求^[6-7]。现场实践表明, 胶筒老化或者管柱蠕动导致封隔器失封的概率超过 80%, 卡、埋管柱的问题频发, 使后期修井作业难度及风险增大, 严重时甚至导致油气井报废^[8]。

目前, 对扩张式裸眼封隔器的研究主要集中在完井管柱受力以及骨架结构等方面, 对耐高温橡胶材料研究很少, 并鲜有关于改善骨架受力状态的报道^[9]。笔者针对裸眼完井-酸压-求产一体化作业需求, 研制了耐高温酸压完井裸眼封隔器, 采用高拉伸率氟橡胶(FKM)制作胶筒, 提高封隔器的耐温性能, 设置锚定机构和进液保护机构提高坐封的可靠性, 降低其在复杂管柱受力和高固相环境中的失效风险。室内和现场试验表明, 耐高温裸眼封隔器高温下的封隔能力强, 解决了胶筒高温长效密封性差、大扩张比锚定和坐封可靠性低的问题。

1 裸眼测试酸压完井封隔器设计

1.1 设计思路

综合考虑塔北作业区奥陶系一间房组储层地质

条件, 以及封隔器在高密度钻井液中下入的工况, 对高温裸眼酸压完井封隔器提出了“封得住、锚得牢、防固相、提得出”的要求, 从结构、材料和工艺等方面对该封隔器进行了优化设计:

1) 钢体采用符合 C110 钢级的材料, 胶筒采用改性氟橡胶制作, 并借助增塑改性技术提高橡胶的伸长率, 优化成型工艺, 保证封隔器在高温 180 ℃ 下长期“封得住”。

2) 采用“内胶筒+重叠钢片骨架+外胶筒”的复合结构, 外胶筒将骨架包裹, 胶筒背压端设置柔性锚瓦, 用以改善重叠钢骨架胀封受力状态, 防止橡胶挤出撕裂和蠕动失封^[10], 确保封隔器“锚得牢”。

3) 中心管进液通道增加启动滑套, 采用投球激活方式, 球与滑套一起落入下部, 打压塞实现二次密封, 憋压方可坐封封隔器, 实现在恶劣工况下的“防固相”。

4) 在中心管进液通道与胶筒内腔之间设置单向阀, 控制通道的开闭。胶筒坐封泄压后胶筒不解封, 需要解封时上提油管, 胶筒与中心管发生相对运动, 单向阀失效, 内压通过泄压槽释放, 胶筒回缩解封^[11], 保证井内工具“提得出”。

1.2 结构设计与工作原理

耐高温裸眼酸压完井封隔器主要由耐高温胶筒总成、坐封单向阀单元、解封单元和启动滑套等组成, 其结构如图 1 所示。坐封之后, 封隔器内的启动滑套、打压塞内的球座及憋压球落入口袋, 管柱泄压封隔器保持坐封状态, 后期转抽时可以上提解封封隔器。



图 1 耐高温裸眼封隔器结构

Fig.1 Structure of a high temperature resistance open hole packer

1.上接头; 2.解封销钉; 3.解封套; 4.启动销钉; 5.启动滑套; 6.单向阀; 7.上硫化头; 8.上端环; 9.支撑骨架; 10.柔性锚瓦; 11.外胶筒; 12.内胶筒; 13.芯轴; 14.下端环; 15.下硫化头; 16.释放套; 17.泄流槽; 18.下接头; 19.打压塞

裸眼封隔器通过管内憋压使胶筒膨胀与井壁接触实现密封, 为了实现实施增产措施和后期生产过程中的密封, 必须保证胶筒与裸眼井壁的接触压力始终大于井底压力^[12]。完井管柱下至裸眼段碳酸盐岩层段上部, 投球坐封封隔器, 封隔器坐到启动滑套上形成密封, 升压剪断启动滑套销钉, 启动滑套与球下行坐到打压塞上形成二次密封; 继续憋压胀封封隔器, 扩张式胶筒与井壁充分接触, 柔性锚瓦扩张锚定在井壁上; 压力继续升高, 打压塞球座与启动滑套一起被剪脱落入口袋。解封该封隔器时,

首先上提管柱, 由于胶筒与井壁之间存在摩擦力, 中心管相对胶筒发生相对运动, 拉断解封销钉, 单向阀失效; 继续上提管柱, 胶筒内部液体通过泄流通道排出, 胶筒外径回缩, 完成解封动作^[13]。

适用于 $\phi 171.4$ mm 裸眼的耐高温封隔器总长度 2 840 mm, 两端为 $\phi 88.9$ mm EUE 油管螺纹, 刚体最大外径 152.0 mm, 胶筒外径 150.0 mm, 启动前工具内通径 45.0 mm, 剪脱后内通径 62.0 mm, 耐温 180 ℃, 额定工作压差 50.0 MPa, 坐封启动压力 8.5 MPa, 解封启动载荷 180 kN。

2 封隔器结构优化及材料优选

扩张式长胶筒是密封的关键,针对高温高压裸眼井筒内密封的技术难点,胶筒背压端设计了锚定承压机构,采用有限元建模方法优化锚瓦包络长度,对FKM进行了针对性的改性增塑和降黏,以满足其耐温和成型工艺要求。

2.1 柔性锚瓦结构优化

为了改善扩张式封隔器承压过程中骨架过度变形导致胶筒破损的问题,在背压端加入柔性锚瓦,以改善钢骨架胀封受力状态,减弱钢带过度变形,防止胶筒端部被挤出撕裂,提高锚定能力,防止蠕动失封^[14-15]。

柔性锚瓦根部通过螺纹与上端环连接,前部内表面与外胶筒接触,外表面有粗牙锯齿,齿间距 10.0 mm,齿高 4.8 mm。坐封过程中,随着胶筒内部压力升高,钢片骨架外扩使锚瓦张开,锚定在井壁上。为了起到支撑保护和锚定的效果,柔性锚瓦除了要具有足够的强度和延展性外,还需要具有合理的尺寸,以防止支撑不足或者变形失稳。锚瓦的张开位移决定了支撑保护效果,锚瓦长度影响着张开位移和锚定力。锚瓦过长,虽然可以提供更大锚定力,但有效密封面的长度缩短;锚瓦过短,更容易扩张锚定,但锚定力变小了,变形后折弯处易出现应力集中。合理的锚瓦长度是保证可靠的胶筒支撑和锚定的必要条件,利用 SolidWorks Simulation 有限元分析软件分析了不同长度锚瓦的张开位移。首先建立柔性锚瓦的三维模型(见图 2(a)),考虑扩张过程中塑性变形较大,选用 Q235 低碳钢制作柔性锚瓦;然后采用 Solid86 单元对模型进行自由网格划分,如图 2(b)所示,材料屈服强度为 235 MPa,弹性模量 206 GPa,泊松比为 0.30。为了保证模型的稳定性,柔性锚瓦一端施加位移约束,封隔器胶筒与柔性锚瓦内侧之间采用粘结方式固定;工作时,柔性锚瓦内侧施加与胶筒内压相等的压力,测试锚瓦长度对其张开位移的影响。

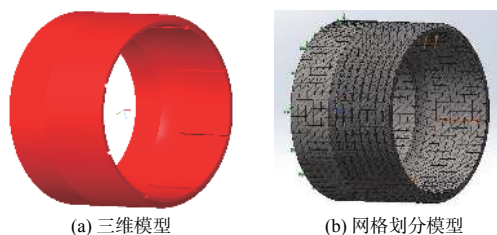


图 2 柔性锚瓦结构建模

Fig.2 Flexible anchor slip structural modeling

施加不同压力,模拟分析长度分别为 100, 150, 200, 250, 300 和 350 mm 柔性锚瓦在不同压力下的张开位移,结果见图 3。

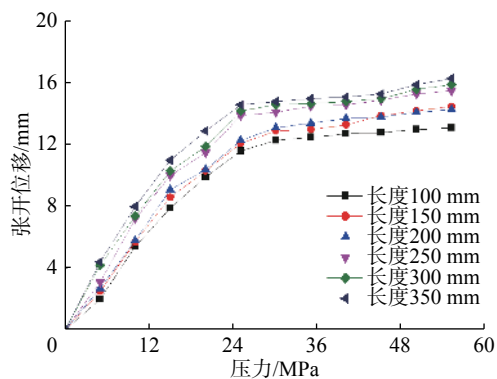


图 3 压力与张开位移的关系

Fig.3 Relation curve of pressure and expansion displacement

从图 3 可以看出,压力低于 35.0 MPa 时,锚瓦张开位移随压力升高而迅速增大;压力高于 35.0 MPa 后,增大趋势放缓。分析表明,相同压力下,锚瓦长度小于 250 mm 时,锚瓦张开位移随着锚瓦增长而增大;但当锚瓦长度大于 250 mm,压力超过 40.0 MPa 时,张开位移增大幅度明显变小,说明锚瓦顶端已经出现失稳。考虑锚瓦过长不利于体现封隔器长密封段的优势,因此,将锚瓦长度定为 250 mm,其在压力 55.0 MPa 下的齿尖单元最大位移定为 18 mm(见图 4)。

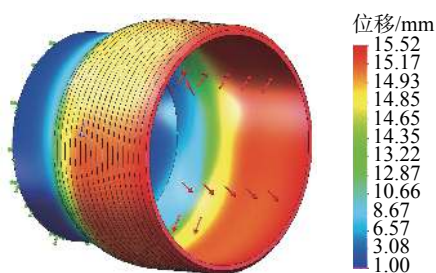


图 4 55 MPa 条件下 250 mm 锚瓦合位移云图

Fig.4 Displacement chart of 250 mm anchor at 55 MPa

2.2 密封胶筒材料选择和制备

密封胶筒除了在机械作用下结构完整性被破坏导致的失效外,还有随着时间增长材料老化导致的失效。即使是耐高温橡胶,在温度、介质条件下都会发生一定程度的老化反应。对于井下耐高温密封材料,温度是最主要的老化失效影响因素,老化过程中同时发生橡胶分子交联键的老化断裂和分子链的断裂,氢化丁腈橡胶(HNBR)和氟橡胶的老化

失效主要形式是交联键断裂,老化后其拉伸强度和拉断伸长率下降,硬度有所提高,外观表现为变硬、变脆^[16-17]。

与 HNBR 相比,FKM 具有更好的高温稳定性和耐硫化氢腐蚀性能,可在 204 ℃ 工况下长期使用,但加工性较差、拉断伸长率偏低。为了改善材料的加工性能,满足伸长率和 180 ℃ 温度下长期密封的需求,对 FKM 进行了改性,在 FKM 中添加邻苯二

甲酸二丁酯和纳米金刚石微粉,以提高其塑性和热稳定性。其中,邻苯二甲酸二丁酯可以显著改善胶料的加工性能,不会降低压缩永久变形;纳米金刚石微粉作为补强剂,可以提高胶料的热稳定性和强度,降低其永久变形。

180 ℃ 温度下,ASTM No.1 标准油对不同橡胶材料的邵尔 A 型硬度、拉伸强度和拉断伸长率随浸泡时间的影响变化趋势如图 5 所示。

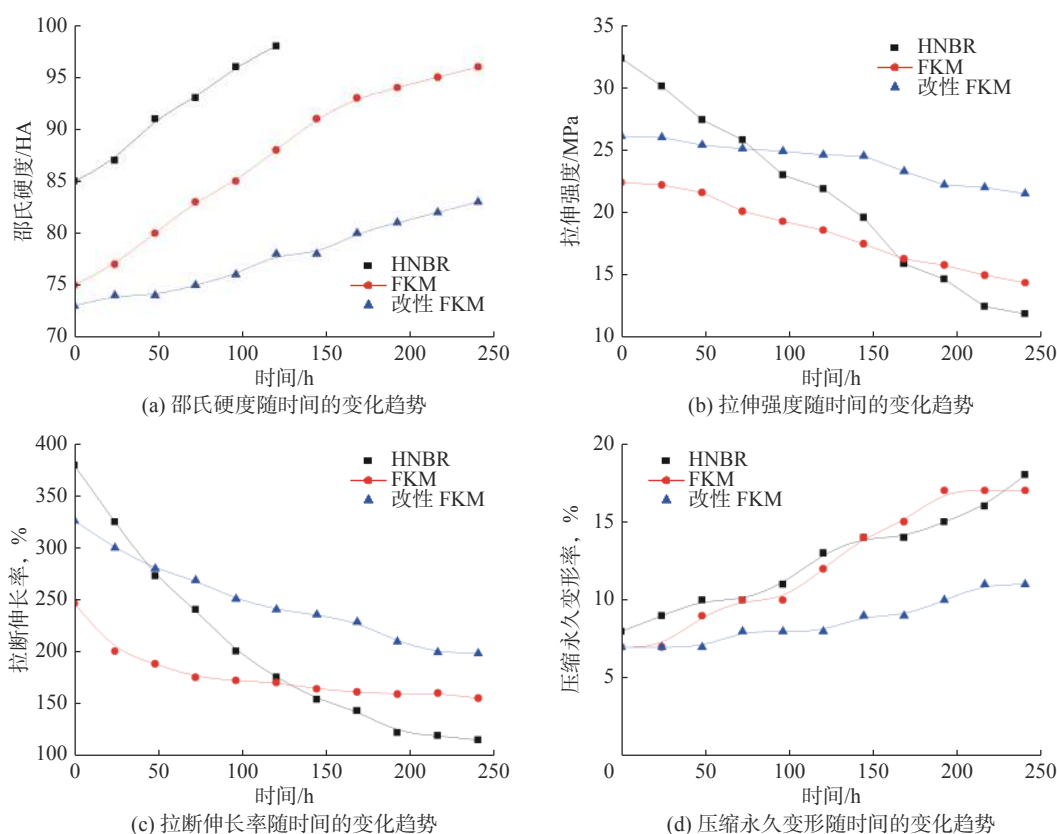


图 5 改性氟橡胶、氟橡胶与氢化丁腈橡胶性能对比

Fig.5 Performance comparison of Modified-FKM, FKM and HNBR

从图 5 可以看出,随着在高温测试液中浸泡时间增长,HNBR 材料的硬度逐渐增大,拉伸强度和拉断伸长率逐渐减小,随着温度升高,改性 FKM 密封件的硬度增幅和拉伸强度与拉断伸长率的降幅并不大,表明改性 FKM 在高温测试液中虽然出现了老化现象,但其热稳定性和强度较 HNBR 和常规 FKM 均有所提高。改性 FKM 的加工性能大幅提高,可以通过大型模具注射成型。

3 封隔器密封性室内试验

参照石油天然气行业标准《扩张式封隔器》

(SY/T 5404—2011)和国家标准《井下工具:封隔器和桥塞》(GB/T 20970—2007)中的规定,进行耐高温封隔器综合性能评价试验,试验流程如图 6 所示,试验套管内径 190.0 mm。采用 ASTM 标准油进行高温承压测试,先加温至 120 ℃,加压至 35 MPa 坐封封隔器,升温至 180 ℃ 后保温 24 h,进行环空密封测试,试压 50 MPa,通过验封通道和观察通道监测密封情况,并在 150~180 ℃ 交变温度下重复测试 4 次,结果见表 1。试验完成后进行封隔器解封,上提力 160~180 kN,解封销钉剪断,胶筒内部泄压,胶筒及钢体部分无可见变形和损坏。

从表 1 可以看出,封隔器橡胶件在 150~180 ℃

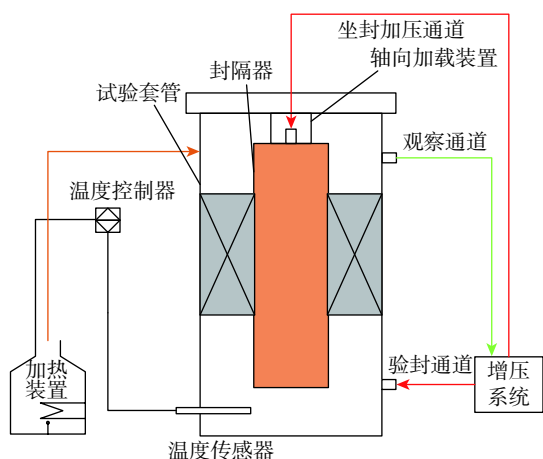


图6 耐高温封隔器地面性能评价流程

Fig. 6 Ground performance appraisal process of a high temperature resistance packer

表1 封隔器地面性能评价试验结果

Table 1 Appraisal test results of ground performance of packer

试验温度/ ℃	保温时间/ h	坐封压力/ MPa	验封压力/ MPa	试验结果
120	12	35		坐封
180	24	50	52	30 min无压降
150	12	51	53	30 min无压降
181	24	50	52	30 min无压降
156	12	52	53	30 min无压降
180	24	50	53	30 min无压降
155	12	50	53	30 min无压降
182	24	52	53	30 min无压降
152	12	51	53	30 min无压降

交变温度下依然能保持密封可靠性。封隔器上提力 185 kN, 行程 230 mm, 封隔器顺利解封。高温封隔器能够在复杂温度、压力条件下实现可靠密封, 满足高温高压状态下进行酸压和生产施工的要求。

4 现场试验

耐高温裸眼封隔器已进行了 4 口井的酸压完井现场试验, 其中, 裸眼直径 171.4 mm, 平均井径 185.0 mm, 最大井径 198.0 mm, 地层温度超过 160 ℃, 最大施工排量 5.2 m³/min, 最大酸压规模 1 067 m³。封隔器经过酸压、放喷和气举等多次作业, 始终未出现井口带压的问题, 降低了施工风险和作业成本。下面以 JY2-2X 井为例介绍其应用情况及效果。

JY2-2X 井位于塔北隆起轮南低凸起西斜坡哈拉哈塘鼻状构造南翼, 采用 $\phi 171.4$ mm 裸眼完井, 平均井径 186.0 mm, 完钻井深 7 249.00 m, 井底温度 175 ℃, 为了封隔 7 190.00~7 200.00 m 井段泥岩漏失层, 并对奥陶系一间房组 7 200.00~7 249.00 m 裸眼井段进行酸压改造, 沟通井周缝洞储集体, 采用耐高温裸眼封隔器+可取式套管封隔器组合的完井管柱(见图 7), 将完井管柱下至裸眼段碳酸盐岩地层上部, 封隔器坐封位置选择物性较差、井径变化较小且没有明显扩径的 7 200.00~7 210.00 m 井段, 压裂后直接求产。泵注酸液 1 062 m³, 最高施工泵压 90 MPa, 最大泵注排量 5.2 m³/min, 封隔器经受住了大规模酸压的考验, 后期解封正常。

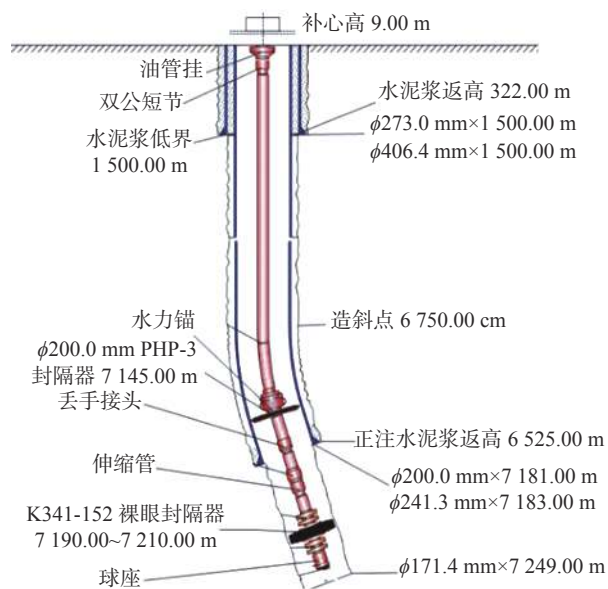


图7 JY2-2X 井裸眼完井管柱结构

Fig.7 Structure of open hole completion string in Well JY2-2X

5 结 论

1)室内试验及现场试验表明, 耐高温裸眼封隔器在井眼内能够顺利下入、坐封和承压, 解决了井温高于 160 ℃ 时无法在裸眼段实施增产措施和封隔器坐封可靠性低的问题, 可为高温高压油气井试油完井提供技术支持。

2)耐高温封隔器采用柔性锚瓦作为锚定支撑结构, 可以将其稳定锚定在井壁上, 防止蠕变失封和胶筒撕裂挤出, 解决了高温高压条件下胶筒破损的问题, 为研制其他高温高压裸眼完井工具提供了新的技术思路。

参 考 文 献

References

- [1] 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, Tarim[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(5): 42–45.
- [2] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 552–558.
JIAO Fangzheng. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 552–558.
- [3] 李永平, 王永辉, 程兴生, 等. 高温深层非均质性碳酸盐岩水平井分段改造技术[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1): 107–111.
LI Yongping, WANG Yonghui, CHENG Xingsheng, et al. Segmented reconstruction technique of high-temperature deep heterogeneous carbonate horizontal well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(1): 107–111.
- [4] 周林波, 刘红磊, 解皓楠, 等. 超深碳酸盐岩水平井水力喷射定点深度酸化压裂技术[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 158–162.
ZHOU Linbo, LIU Honglei, XIE Haonan, et al. Fixed-point acid fracturing technology in the ultra-deep carbonate horizontal well[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 158–162.
- [5] 刘辉, 袁学芳, 文果, 等. 超深碳酸盐岩油藏水平井套管分段酸压技术实践[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 33–35.
LIU Hui, YUAN Xuefang, WEN Guo, et al. Practice of stage acid frac in cased horizontal well in ultradeep carbonate reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(4): 33–35.
- [6] 徐路, 黄世财, 张超, 等. 国产 LXX 系列高温裸眼封隔器的应用及评价[J]. 中国西部科技, 2014, 13(8): 49–51, 68.
XU Lu, HUANG Shicai, ZHANG Chao, et al. Application and evaluation of domestic LXX high temperature openhole packer[J]. *Science and Technology of West China*, 2014, 13(8): 49–51, 68.
- [7] 王洋, 赵兵, 袁清芸, 等. 顺9井区致密油藏水平井一体化开发技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 48–52.
WANG Yang, ZHAO Bing, YUAN Qingyun, et al. Integrated techniques in tight reservoir development for horizontal wells in Block Shun 9[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4): 48–52.
- [8] 刘练, 张佳, 王峰, 等. 高温高压裸眼封隔器的改进及应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(5): 77–79.
LIU Lian, ZHANG Jia, WANG Feng, et al. Improvement and application of HTHP open hole packer in Tahe Oilfield[J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(5): 77–79.
- [9] 刘阳, 秦金立. 无骨架内衬扩张式封隔器的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 69–73.
LIU Yang, QIN Jinli. Development and field test of non-lining inflatable packers[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 69–73.
- [10] 杨晓龙, 刘丽娟, 张承武. 钢带封隔器胶筒护箍喇叭口优化设计[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(3): 161–163, 173.
YANG Xiaolong, LIU Lijuan, ZHANG Chengwu. Optimization design protector bell of steel packer rubber[J]. *Machine Design and Research*, 2015, 31(3): 161–163, 173.
- [11] 张承武, 王兴建, 陈建刚. 分段压裂封隔器叠层钢片膨胀筒的密封机理[J]. 石油机械, 2007, 35(3): 5–7.
ZHANG Chengwu, WANG Xingjian, CHEN Jiangang. Seal mechanism of the overlapped steel strip inflatable tube of stepwise fracturing packer[J]. *China Petroleum Machinery*, 2007, 35(3): 5–7.
- [12] 全少凯, 崔会贺, 齐加德, 等. 水力锚锚爪结构对套管变形及挤压应力的影响[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(6): 59–65.
TONG Shaokai, CUI Huihe, QI Jiade, et al. The effect of hydraulic anchor structure on casing deformation and extrusion stress[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(6): 59–65.
- [13] 胡志强, 杨进, 李中, 等. 高温高压井双封隔器管柱安全评估[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(3): 288–292.
HU Zhiqiang, YANG Jin, LI Zhong, et al. Safety assessment on twin-packer string of HTHP well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(3): 288–292.
- [14] 江汉石油管理局采油工艺研究所, 江汉石油学院采油教研室. 封隔器理论基础与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 37–40, 59–60, 77–78.
Oil Production Technology Research Institute of Jianghan Petroleum Administration Bureau, Oil Production Teaching and Research Office of Jianghan Petroleum Institute. Theory foundation and application of packer[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 37–40, 59–60, 77–78.
- [15] 程心平. 扩张式封隔器胶筒力学性能分析[J]. 石油机械, 2014, 42(6): 72–76.
CHENG Xinping. Mechanical properties analysis of expandable packer rubber[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(6): 72–76.
- [16] 张奎林, 谷磊. 尾管顶部封隔器密封胶筒设计与试验[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 381–384.
ZHANG Kuilin, GU Lei. Design and experiment research on sealing rubber tube of top packer of liner hanger[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2018, 25(3): 381–384.
- [17] 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.

[编辑 滕春鸣]