

川西须家河高应力致密储层完井技术

夏彪,刘啸峰,唐鹏程,卢丽

中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院 四川德阳 618000

通讯作者:Email:272519311@qq.com

引用:夏彪,刘啸峰,唐鹏程,等. 川西须家河高应力致密储层完井技术 [J]. 油气井测试,2023,32(4):50-55.

Cite: XIA Biao, LIU Xiaofeng, TANG Pengcheng, et al. Completion technology of heavily stressed and tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe formation in west Sichuan depression. [J]. Well Testing, 2023, 32(4): 50-55.

摘要 川西须家河高应力致密储层破裂压力高、改造排量低、完井管柱安全风险高,通过对前期储层改造井系统梳理分析,从井口限压、降破工艺、完井管柱及工具结构等方面出发,配套完善了一套适用于致密储层压裂改造的技术。D201井采用140 MPa井口装置提高施工压力到120 MPa,相比105 MPa井口提高施工压力25 MPa,解决了井口限压低、加砂难度大的问题;M2井采用后效射孔技术改善高破裂压力井近井地带的渗流形态,有效提高储层的可压性;X5井采用Φ114.3 mm+Φ88.9 mm大尺寸油管配套高强度工具的完井技术,提高施工排量及管柱安全性,满足高应力致密储层大排量、大液量、高施工压力的改造需求。该技术的成功应用为高应力致密储层完井提供了新思路,为储层产能释放提供了技术保障。

关键词 须家河致密储层;储层改造;降破工艺;井口装置;后效射孔;破裂压力;可压性;完井管柱优化

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.04.009

Completion technology of heavily stressed and tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe formation in west Sichuan depression

XIA Biao, LIU Xiaofeng, TANG Pengcheng, LU Li

Petroleum Engineering Technology Research Institute of Petrochina Southwest Oil and Gas Company, Deng Yang, Sichuan 618000, China

Abstract: The Xujiahe high stress tight reservoir in western Sichuan has high fracture pressure, low transformation displacement, and high safety risk of testing strings. Through sorting and analyzing the well system of the previous reservoir transformation, a set of technologies suitable for tight reservoir fracturing transformation has been developed from the aspects of wellhead pressure limiting, fracture reduction technology, testing strings, and tool structure. The D201 well adopts a 140 MPa wellhead device to increase the construction pressure to 120 MPa, which is 25MPa higher than the 105MPa wellhead. This solves the problems of low wellhead pressure limit and high difficulty in adding sand; The M2 well adopts post effect perforation technology to improve the flow pattern near the wellbore of high fracture pressure wells, effectively improving the compressibility of the reservoir; Well X5 adopts Φ 114.3 mm+Φ88.9 mm large-sized oil pipes equipped with high-strength tools improves the construction displacement and string safety, meeting the transformation needs of high displacement, large liquid volume, and high construction pressure in high stress and tight reservoirs. The successful application of this technology provides a new approach for testing high stress and tight reservoirs, while also providing technical support for releasing reservoir productivity.

Keywords: Xujiahe tight reservoir; reservoir stimulation; breaking down process; wellhead device; aftereffect perforation; fracturing pressure; compressibility; optimization of completion string

川西须家河资源量丰富,但其埋藏深、岩性致密的特征导致储层地层破裂压力极高,压裂施工异常困难,施工排量受限,开发难度极大^[1-2]。白仲义等^[3]、程启贵等^[4]、杨浩等^[5]针对致密储层破裂压力高的问题,分析高破裂压力产生的原因为致密储层的渗流阻力大,而常规射孔压实带的存在造成渗透率降低导致破裂压力进一步增加;分别研究了后

效射孔,集束复合射孔,增效复合射孔、喷砂射孔等工艺,通过对射孔工艺的优化对于致密储层均有一定降破效果。石小磊等^[6]、刘祥康等^[7]、王汉等^[8]针对高施工压力储层完井管柱安全风险高的问题,综合温度、压力、井眼轨迹、管柱屈曲及摩擦力等一系列因素,建立了管柱力学分析方法,对完井管柱设计具有指导意义。上述研究成果,通过对各种射

孔工艺在不同区块的应用来看,能够起到降低破裂压力的效果,但在提高施工排量效果有限。本文针对川西须家河高应力致密储层改造过程中存在的难点及风险,为解决储层高破裂压力的问题,通过对比改区块前期降破工艺应用情况,优选了后效射孔技术;为有效提高改造过程中施工排量,通过管柱力学计算分析,在提高施工压力的前提下,创新设计了Φ114.3 mm+Φ88.9 mm大尺寸油管组合,并对关键完井工具进行了优化;综合考虑降破措施、施工压力、管柱及工具结构等因素,提出了一套安全、高效、可推广的川西须家河高应力致密储层完井技术。

1 完井难点

(1)储层应力高、埋藏深,储层改造在施工限压 95 MPa(105 MPa 井口)下、排量低(<3.0 m³/min),

无法满足加砂压裂改造施工的要求。
(2)须家河气藏地层破裂压力高,储层难以有效压开,常规射孔压实污染地层,降破工艺有待进一步优化。
(3)完井管柱在改造中存在封隔器窜漏、管柱断落、滑套开启困难等问题。

2 提高储层可压性

须家河组岩性致密、杨氏模量及泊松比高,导致高破裂压力,压破地层困难。从施工井统计分析来看,川西新场构造北部的丰谷构造、高庙子构造、合兴场构造以及大邑地区须家河组表现出了异常高破裂压力特征,在常规压力级别(105 MPa)井口或高压设备,破压梯度大于 2.5 MPa/100 m。通过采取酸化、喷砂射孔、加重酸化等多种降破措施,仍然不能压开储层(见表 1),统计区改造井成功率仅 50%。

表 1 未压开储层井统计
Table 1 Statistics of unconsolidated reservoir wells

井号	构造	层位	井段/m	降破工艺	压裂情况	破压梯度/(MPa/100 m)
D2	大邑构造	T ₃ x ²	5 395~5 550	酸化	90 MPa 未压开	>2. 67
D4	大邑构造	T ₃ x ²	5 810~5 850	酸化	85 MPa 未压开	>2. 46
D7	大邑构造	T ₃ x ²	5 390~5 423	喷砂射孔	95 MPa 未压开	>2. 84
F22	丰谷构造	TX ₄ ⁵	3 904~4 000	加重酸化	93 MPa 未压开	>3. 38
C562	高庙构造	T ₃ x ²	4 921~4 995	喷砂射孔	95 MPa 未压开	>2. 93
S1	合兴场构造	T ₃ x ²	4 906~4 969	酸化	86 MPa 未压开	>2. 75

2.1 提高井口限压

经前期统计发现,须家河组气藏表现异常高应力储层特征,在压裂改造时施工破裂压力高、裂缝延伸压力高,常规压裂装备能力下(地面限压 95 MPa)不能有效的压开储层,或压开储层后由于施工排量低不能完成对气藏的有效水力压裂改造。
采用超高压设备及 140 MPa 井口装置提高施工限压进行压裂施工。D201 井 Tx₂¹⁻³(5 540~5 545 m)第一次试破未压开储层,更换 140 MPa 井口装置后完成压裂施工(见图 1),主压裂地层破裂压力 144.15 MPa,地层破裂压力梯度 2.74 MPa/100 m,施工排量 2.3~2.6 m³/min(最高排量 2.8 m³/min),施工压力 108~118 MPa,入地液量 553.26 m³,入地砂量 4.78 m³,平均砂比 1.14%,停泵压力 88.82 MPa,停泵压力梯度 2.69 MPa/100 m,施工压力高,加砂施工难度大,储层表现孔隙性致密储层。

2.2 降破工艺

在常规压裂的基础上配套酸化、喷砂射孔、加重酸化等多种降破措施,仍难以有效压开储层,前

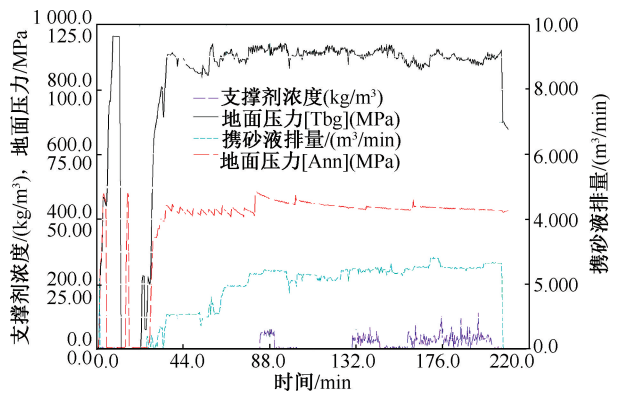


图 1 D201 井主压裂施工曲线
Fig.1 Main fracturing construction curve of well D201
期施工成功率仅 50%,极大的制约了该区域的产能建设[9-11]。

针对前期降破措施应用效果较差、常规射孔压实污染地层、常规射孔弹爆炸能力损失严重等问题,引进了后效射孔技术。该技术在常规射孔的基础上,利用聚能射孔弹产生的高速射流和爆炸产物形成的负压,将后效粒子带入进射孔孔道,在高温高压条件下,粒子在孔道内摩擦、碰撞进行二次爆

轰,可解除射孔压实带、清洁孔道、形成微裂缝。

后效射孔技术应用分仓爆炸技术思路,在常规聚能射孔基础上安装后效体药剂,把 2 个能量点分仓进行处理,分别作用于不同目标体,依靠聚能射流穿透套管和地层,后效粒子二次做功,可大幅增加孔道与地层天然裂缝的沟通能力,以降低储层破裂压力、实现增产增效(见图 2)。

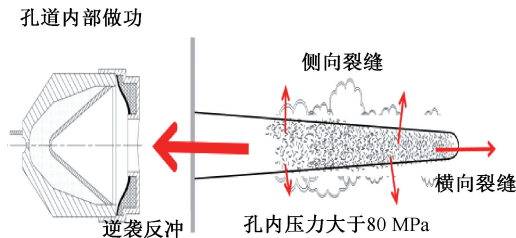


图 2 后效射孔技术原理

Fig. 2 Principle of aftereffect perforating technology

与常规聚能射孔工艺相比,后效射孔能够降低表皮效应,恢复自然产能,常规聚能射孔是通过增大孔密、孔径、穿深来增大渗流面积,但方法本身又会造成新的污染,使表皮系数大幅增高,渗透性大幅降低,增产有限。后效射孔选用高性能射孔弹相配套,不仅增大渗流面积,同时利用孔内爆炸技术清除孔内碎屑污染,使表皮系数大幅降低,渗透性和产量大幅提高。此外,与常规复合射孔相比,后效射孔的优势还体现在:①后效体在地层孔道中连环爆炸,后效爆炸脉冲与射孔弹爆炸脉冲时差大于 30 ms,无爆轰叠加,减小射孔枪内环空压力;②后效体不属于爆炸品,运输安全性高,运输方便;③由于后效体独特的做功方式,可提高和扩大射孔孔眼的穿深和孔径,接触压实带,增大能量波及释放范围(见图 3);④能量利用率高,耐高温性能优异。

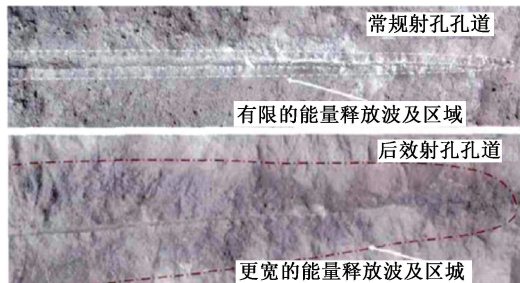


图 3 常规射孔与后效射孔孔道对比

Fig. 3 Comparison between conventional perforation and aftereffect

2.3 应用效果

M2 井采用 140 MPa 井口,选择底部射孔段进行后效射孔,通过与上层压裂情况对比分析验证射孔

效果。该井射孔后后效显著,持续时间为 20 min。改造施工显示,第一层(泵压 100~107 MPa,排量 3.2 m³/min)比储层物性更好的第二层 4 755~4 776 m(泵压 107 MPa,排量 2.4 m³/min)的施工压力更低、排量更高、加砂浓度更高(见表 2)。

表 2 各层加砂压裂难度的对比分析

Table 2 Comparative analysis of the difficulty of sand fracturing in each layer

层段	加砂压裂的难度		停泵压力/ MPa
	加砂时的排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	最高加砂 浓度/%	
第一层(后效射孔)	3.2	200	91
第二层(常规射孔)	2.4	150	95

最终 M2 井挖潜获得测试产量 4.92×10⁴ m³/d。总体上,M2 井后效射孔工艺与常规工艺相同,仅增加后效体药剂费用 5 万元,其射孔作业工艺简单、作业时间短、费用相对低,效果显著。

3 完井管柱及关键工具优化

须家河组储层砂体厚度大,为满足勘探开发需要,提高改造针对性,有效性须采用分段改造。超高压施工、大排量改造管柱安全面临巨大挑战^[12-14]。

3.1 完井管柱优化

前期完井管柱采用 Φ88.9 mm×9.53 mm P110NU+Φ88.9 mm×6.45 mm P110 NU 组合。结合井身结构,为尽可能降低改造过程中摩阻,提高施工排量,尾管悬挂器上部采用 Φ114.3 mm×8.56 mm Q125 NU+Φ114.3 mm×8.56 mm P110 NU 油管。尾管悬挂器下部为 Φ139.7 mm 套管,考虑封隔器之间可能形成高压区,管柱会产生较大的轴向力,可能导致管柱渗漏或断裂,下部油管由 Φ88.9 mm×6.45 mm P110 NU 改进为 Φ88.9 mm×9.52 mm P110 NU。

对比 Φ88.9 mm 与 Φ114.3 mm+Φ88.9 mm 管柱组合,按照延压梯度 2.5 MPa/100 m 计算,优化后的 Φ114.3 mm+Φ88.9 mm 组合管柱,在井口限压 120 MPa 的情况下,最高施工排量可以达到 8 m³/min,较优化前可提高排量 5 m³/min。同时在相同排量条件下,优化后管柱摩阻得到明显降低,最高可降低 28.2 MPa(见表 3)。

管柱力学分析方法中三轴应力强度校核的方法较为科学和合理,三轴安全系数是综合考虑井筒温度、压力、轨迹等一系列因素,计算管柱中轴向应

表 3 管柱优化前后施工排量及摩阻对比

Table 3 Comparison of construction displacement and frictional resistance before and after pipe column optimization

管柱组合	项目	排量/(m ³ ·min ⁻¹)						
		2	3	4	5	6	7	8
Φ88.9 mm (优化前)	井口施工压力/MPa	104.75	118.75	124.55	137.75	152.75	160.75	168.95
	管柱摩阻/MPa	12.6	26.6	32.4	45.6	60.6	68.6	76.8
Φ114.3 mm+Φ88.9 mm (优化后)	井口施工压力/MPa	74.53	78.79	84.41	91.3	99.43	108.74	119.21
	管柱摩阻/MPa	3.92	8.18	13.8	20.7	28.82	38.13	48.6

力、径向应力、周向应力分布,是管柱施工过程中最复杂的力学因素^[15-17]。以 1 000 mΦ114.3 mm×8.56 mm Q125 NU +3 000 mΦ114.3 mm×8.56 mm P110 NU+1 000 mΦ89 mm×6.45 mm P110 管柱组合为例,在模拟计算极限工况施工压力 120 MPa,环空压力 60 MPa,排量 10 m³,管柱最小三轴安全系数由优化前 1.21 提升为 1.44(见图 4),满足施工要求同时极大提升了管柱安全。

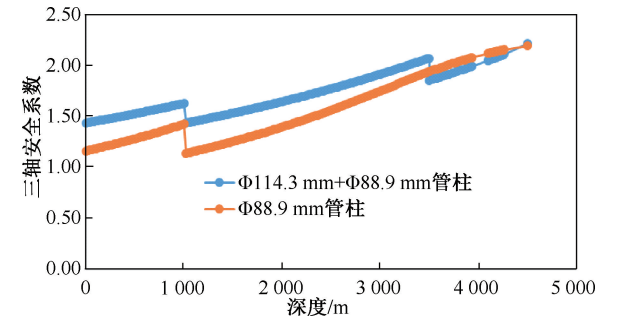


图 4 管柱三轴安全系数图

Fig. 4 Three-axis safety factor diagram of pipe string

3.2 完井工具优化

在改造过程中会产生较大的活塞力,按照 70 MPa 压差计算封隔器管串会产生 434 kN 活塞力,设计顶部和底部为有下卡瓦支撑 Y241 封隔器,中间段采用 Y341 封隔器,封隔器上部均带水力锚,提高锚定力,避免管串移动^[18-20]。

Y341 封隔器缸套及中心管材质由 40crnimo 优化为 hrc37-41,增加滑套壁厚,提升封隔器及滑套本体耐压强度^[21-23]。水力锚齿材质由 42crmo 优化为硬质合金,提升锚定力。工具上下连接端扣型由 Φ73 mm×5.51 mm P110NU 扣改进为 Φ73×7.01 P110 气密扣或 Φ89×6.45 P110 气密扣,提升连接端强度(见表 4)。原则上工具抗拉强度应不低于 500 kN,抗内压强度不低于 70 MPa。

3.3 应用效果

X5 井采用 Φ114.3 mm 油管+Φ88.9 mm 大尺寸油管组合,顶部和底部采用 Y241 封隔器,中间采用 Y341 封隔器,分三段改造(见图 5)。

表 4 优化后工具参数

Table 4 Tool parameters after optimization

工具	优化前		优化后	
	抗内压/ MPa	抗拉/ kN	抗内压/ MPa	抗拉/ kN
Φ193.7 mm 水力锚	105.00	973	105.00	1 507
Φ193.7 mm Y241 封隔器	105.34	973	105.34	1 507
Φ139.7 mm 水力锚	105.00	621	105.00	1 103
Φ139.7 mm Y341 封隔器	75.83	621	82.70	1 103
滑套	84.99	621	130.00	1 103
Φ139.7 mm Y241 封隔器	94.46	565	94.46	1 103

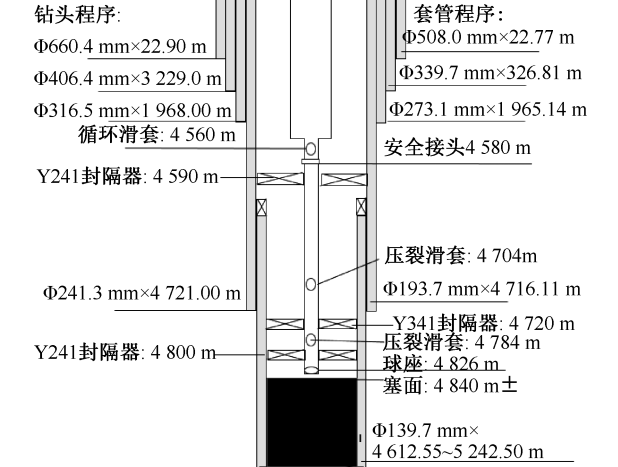


图 5 X5 井管柱示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Well X5 String

通过优化油管组合、工具连接扣型、水力锚锚爪材质、封隔器缸套材质等,提高了完井管柱强度。X5 井顺利完成了施工压力 53 ~ 118 MPa、液量 2 809.3 m³、砂量 122.5 m³、排量 0.5 ~ 8 m³/min 的 3 段分段压裂试气施工(见图 6)。

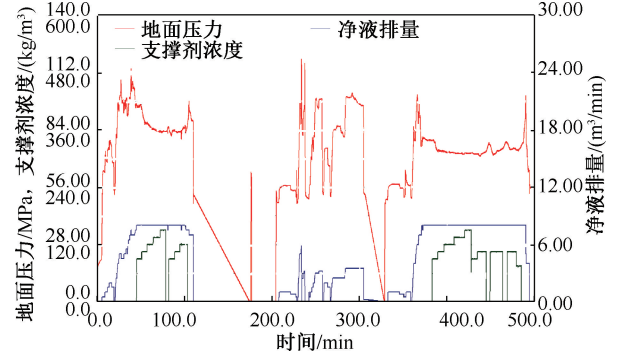


图 6 X5 井压裂施工曲线

Fig. 6 Fracturing Construction Curve of Well X5

4 结论

(1) 须家河储层致密, 破裂压力高, 常规压裂装备能力下(地面限压 95 MPa) 不能有效的压开储层、需采用超高压设备及 140 MPa 井口装置提高施工限压进行压裂施工。

(2) 后效射孔工艺可大幅度提高射孔孔径和孔道容积, 消除常规射孔后近井地带的压实污染, 能在一定程度上改善地层渗流形态, 达到储层增产增注的目的。

(3) 采用 $\Phi 114.3$ mm 油管+ $\Phi 88.9$ mm 大尺寸油管组合并配套高强度的完井工具可满足须家河高应力致密储层大排量、大液量、高施工压力的改造需求。

(4) 须家河高应力致密储层改造技术的配套完善为同类储层改造提供了新思路, 同时为储层产能释放提供了技术保障。

致谢: 感谢西南油气分公司石油工程技术研究院同意本文公开发表。感谢史雪枝、尹郎、张国东等人在论文修改方面做出的贡献。

参考文献

- [1] 蒲洪江, 何兴贵, 黄霞. 四川盆地元坝地区陆相储层高破裂压力成因与技术对策[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 65-70.
PU Hongjiang, HE Xinggui, HUANG Xia. Technological strategies for and causes of high fracture pressure of continental reservoirs in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 65-70.
- [2] 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 83-92.
JIA Ailin, WEI Yunsheng, GUO Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92.
- [3] 白仲义, 齐安. 侏罗系延安组油藏后效射孔投产效果分析[J]. 石化技术, 2019, 26(5): 138-142.
BAI Zhongyi, QI An. Post effect perforation effect analysis of Jurassic Yan'an Formation reservoir[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(5): 138-142.
- [4] 程启贵, 马超亚, 秦民君, 等. 后效体复合射孔增产增注技术研究与应用[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(8): 1362-1367.
CHENG Qigui, MA Chaoya, QIN Minjun, et al. Research and application of aftereffect compound perforating technology for increasing production and injection[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 8(8): 1362-1367.
- [5] 杨浩, 包智魁, 张继成. 低渗透油藏后效射孔产能模型建立及应用[J]. 中外能源, 2021, 26(2): 44-49.

- YANG Hao, BAO Zhikui, ZHANG Jicheng. Establishment and application of post effect perforation productivity model in low permeability reservoir [J]. Sino-Global Energy, 2021, 26(2): 44-49.
- [6] 石小磊, 黄文君, 高德利. 考虑屈曲和摩擦力的高温高压井管柱力学分析[J]. 石油机械, 2020, 48(11): 111-118.
SHI Xiaolei, HUANG Wenjun, GAO Deli. Mechanical analysis of tubular in high temperature and high pressure well considering buckling and friction [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(11): 111-118.
- [7] 刘祥康, 丁亮亮, 李玉飞, 等. 超深气井完井管柱屈曲行为研究[J]. 石油机械, 2020, 48(2): 29-34.
LIU Xiangkang, DING Liangliang, LI Yufei, et al. Study of the buckling behavior of completion strings for ultra-deep gas wells [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(2): 29-34.
- [8] 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. Research on optimization of multiple packer completion string [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(S1): 8-11.
- [9] 林永茂, 何颂根, 杨永华, 等. 喷砂射孔降破技术在超深海相碳酸盐岩的应用[J]. 断块油气田, 2019, 26(5): 653-656.
LIN Yongmao, HE Songgen, YANG Yonghua, et al. Application of sandblast perforation in ultra-deep marine carbonate reservoir [J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2019, 26(5): 653-656.
- [10] 胡文丽, 徐新华, 闫正和, 等. 一种新型后效射孔技术及应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(7): 31-34.
HU Wenli, XU Xinhua, YAN Zhenghe, et al. A new post effect perforation technology and its application [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(7): 31-34.
- [11] 葛俊瑞, 李三喜, 李艳飞, 等. 后效复合射孔技术在海上低孔渗油气藏的探索应用[J]. 海洋石油, 2018, 38(4): 52-56.
GE Junrui, LI Sanxi, LI Yanfei, et al. Exploration and application of post effect composite perforation technology in offshore low porosity and permeability oil and gas reservoirs [J]. Offshore Oil, 2018, 38(4): 52-56.
- [12] 高德利, 黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 620-647.
GAO Deli, HUANG Wenjun. Some research advances in downhole tubular mechanics and control methods [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 620-647.
- [13] HUANG W. J, GAO D. L. Combined effects of wellbore curvature, connector, and friction force on tubular buckling behaviors [J]. SPE Journal, 2019.
- [14] 李子丰. 油气井管柱冲击动力问题研究概况和发展趋势[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 604-610.
LI Zifeng. Research situation and development trend of

- string dynamic shock in oil and gas wells [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40 (5): 604-610.
- [15] 李子丰,王长进,田伟超,等. 钻柱力学三原理及定性模拟实验[J]. *石油学报*, 2017, 38(2): 227-233.
- LI Zifeng, WANG Changjin, TIAN Weichao, et al. Three principles of drill string mechanics and qualitative simulation experiments[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38 (2): 227-233.
- [16] 祝效华,李波,李柯,等. 大斜度井钻柱动态摩阻扭矩快速求解方法[J]. *石油学报*, 2019, 40(5): 611-620.
- ZHU Xiaohua, LI Bo, LI Ke, et al. Quick solution method for dynamic friction torque of drilling string in a highly-deviated well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40 (5): 611-620.
- [17] 祝效华,李柯,安家伟. 水平井钻柱动态摩阻扭矩计算与分析[J]. *天然气工业*, 2018, 38(8): 75-82.
- ZHU Xiaohua, LI Ke, AN Jiawei. Calculation and analysis of dynamic drag and torque of horizontal well strings[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38 (8): 75-82.
- [18] 管志川,李成,许玉强,等. 深水高温高压井管柱固定型封隔器失封及控制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(3): 65-72.
- GUAN Zhichuan, LI Cheng, XU Yuqiang, et al. Failure and control of fixed down-hole packer in deepwater HPHT wells [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(3): 65-72.
- [19] 刘洪涛,沈新普,刘爽,等. 高温高压气井多封隔器管柱完整性分析方法及应用实例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 83-89.
- LIU Hongtao, SHEN Xinpu, LIU Shuang, et al. Integrity analysis method of multi-packer string in HTHP gas wells and its application cases[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 83-89.
- [20] 李明飞,窦益华,曹银萍,等. 力法在多封隔器管柱轴向力分析中的应用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 89-96.
- LI Mingfei, DOU Yihua, CAO Yinping, et al. Application of force method to axial force analysis of multi-packer tubing [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2020, 35(1): 89-96.
- [21] 窦益华,张福祥. 高温高压深井试油井下管柱力学分析及其应用[J]. *钻采工艺*, 2007, 30(5): 17-20.
- DOU Yihua, ZHANG Fuxiang. Mechanical analysis of well testing down-hole string in deep well with HTHP and its application[J]. *Drilling & Production Technology*, 2007, 30(5): 17-20.
- [22] 冯建华,罗铁军,金学锋. 双封隔器复合管柱受力分析方法及应用[J]. *石油钻采工艺*, 1993, 15(2): 54-62.
- FENG Jianhua, LUO Tiejun, JIN Xuefeng. Mechanics of two-packer tubing and its application [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1993, 15(2): 54-62.
- [23] 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.

编辑 方志慧

第一作者简介:夏彪,男,1986年出生,工程师,硕士研究生,2013年毕业于西南石油大学油气田开发专业,现主要从事完井测试相关研究。电话:0838-2551326, 15184341550, Email:272519311@qq.com。通信地址:四川省德阳市旌阳区龙泉山北路298号,邮政编码:618000。