

试油测试一体化工艺在 GT1 井的应用

庞振力¹, 杜卫刚¹, 张宏胜², 夏林³, 季鹏¹

1. 中国石油集团海洋工程有限公司天津分公司 天津 300451

2. 华北油田雄安分公司技术研究所 河北任丘 062552

3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气合作开发分公司 天津 300280

项目支持: 中石油海洋公司天津分公司科技研发项目“海上高温高压超深井测试关键技术研究”(202302-0201)

通讯作者: Email: pangzl01. cpoe@cnpc.com.cn。

引用: 庞振力, 杜卫刚, 张宏胜, 等. 试油测试一体化工艺在 GT1 井的应用[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 32-37.

Cite: PANG Zhenli, DU Weigang, ZHANG Hongsheng, et al. Application of integrated testing techniques in well GT1[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 32-37.

摘要 GT1 井是集团公司海上潜山构造上的一口“高温、高压”重点风险探井, 针对该井储层特点、井身结构、试油测试目的及施工周期安排等, 优化设计了射孔-测试-排液-酸化解堵一体化管柱, 可实现射孔、测试、排液、解堵 4 项功能, 实现了四联作工艺技术。确保探井测试成功, 并全取全准测试资料。解决了海上施工周期短、污液处理难等问题, 减少了地层污染, 与常规试油工艺相比, 缩短试油周期 6 d, 提高生产效率 35%, 生产污液回收减少 260 m³, 同时获取了原始地层压力、酸后解堵地层能量及排液后地层能量。提高了海上高温高压深井测试作业效率, 降低了井控风险, 保护了储层。该井的顺利完成为海上高温高压深井测试、解堵作业积累了宝贵经验, 对后续探井勘探开发具有重要的指导意义。

关键词 高温高压; 一体化管柱; 酸化解堵; 地层测试; 地层能量; 作业效率; 井控风险; 现场应用

中图分类号: TE273

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.006

Application of integrated testing techniques in well GT1

PANG Zhenli¹, DU Weigang¹, ZHANG Hongsheng², XIA Lin³, JI Peng¹

1. Tianjin Branch of CNPC Offshore Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China

2. Technical Research Institute of Xiong'an Branch of North China Oilfield, Renqiu, Hebei 062552, China

3. Oil and Gas Cooperative Development Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280, China

Abstract: Well GT1 is a key CNPC risk exploratory well under high-temperature and high-pressure in an offshore buried hill structure. Considering the reservoir characteristics, well structure, testing objectives, and the operation schedule, an optimized integrated tubing system was designed to perform perforation, testing, drainage, and acidizing simultaneously, realizing a combined operation technique. The technique can ensure the successful testing of the exploratory well and the accurate acquisition of test data. It addresses the challenges such as short offshore operational cycles and difficult waste fluid management, reducing formation contamination. Compared to conventional well testing methods, this integrated approach shortened the testing period by six days, improved operational efficiency by 35%, and reduced the recovery of contaminated fluid by 260 m³. Additionally, it provided valuable data on initial formation pressure, post-acidizing formation energy, and post-drainage formation energy. This approach enhances the efficiency of offshore high-temperature, high-pressure deep well testing, reduces well control risks, and protects the reservoir. The successful completion of this well offers valuable insights into offshore high-temperature, high-pressure deep well testing and stimulation operations, providing significant guidance for the development of future exploratory wells.

Keywords: high temperature and high pressure; integrated pipe string; acidizing; formation testing; formation energy; operational efficiency; well control risk; field application

探井测试是油气资源勘探的临门一脚, 是发现油气资源的重要手段, 随着渤海湾油气勘探领域的不断拓展, 逐步步入深层、超深层领域, 发现了渤中

潜山地层大型油气田, 凸显出渤海湾深层、超深层的巨大勘探潜力^[1-3]。但是深层、超深层油气资源与之相伴的是油藏埋藏深、成藏条件复杂, 具有显

著的高温高压特征、复杂的地层条件以及井筒不完整性^[4-5]。并且海上平台空间狭小,海上探井测试窗口周期短,苛刻的环境现状,给海上探井测试作业带来极大的风险和挑战^[6-8]。

陈超峰等^[9]针对准噶尔盆地南缘西段高温高压超深井,探井测试与措施改造时,超高力、超高地破压力、不规则井身结构、及国产测试工具耐温耐压等级限制等因素,通过降低环空套压,替入加重试油工作液、油套双流程控压等技术,采用“光油管”试油压裂工艺技术,提高施工安全系数。温杰文等^[10]针对川西二叠系油藏超深,地层压力大,储层间易漏易窜,裂缝发育较好,储层间压力系统不一致,给探井测试、措施改造施工增加难度,设计了分段酸化—测试—完井一体化管柱,一趟管柱可实现分段酸化、获取井下资料,封堵保护储层,更换管柱完井投产。潘登等^[11]利用射孔—酸化—测试—封堵及完井五联作管柱,一趟管柱可实现5项功能。不仅有效解决测试后井漏及产层损害难题,将探井测试作业与完井作业有效链接,实现一体化作业,大大提高试油及完井作业效率。邹洪岚等^[12]针对塔里木油田迪那气藏为异常高压超深气藏,采用缓释酸、超正压射孔技术,现场应用取得了显著的效果。刘洪涛等^[13]针对塔里木库车山前储层“三高”的特点,测试工具在中高密度钻井液高温环境下长时间静止,工具易失效且老化沉淀泥浆堵塞管柱,埋卡封隔器等风险,设计了“三阀一封”、“四阀一封”、“五阀一封”等一系列测试管柱体系。程青松等^[14]针对塔里木油田超深高温高压井地层测试,升级工具密封材料、优化工具密封组合形式、设计弹簧结构三胶筒结构等方式提高工具性能,为超深高温高压井高质量勘探开发打下了坚实的基础。

综上所述,学者对陆地超深超高压高温气井测试、措施改造等测试配套技术开展了大量研究,但是针对海上高温高压超深井测试、措施作业研究较少,因此针对渤海湾海上探井测试、措施改造施工难点,经过多年的施工经验积累和探索,逐渐形成了海上高温高压深层探井测试配套技术。受探井测试工期影响,优化高温高压深井探井测试管柱结构,采用一体化管柱工艺实现射孔、测试、排液、酸化解堵等多项作业的联作管柱结构,根据运行周期、测试目的、地层条件、井身结构及措施作业等工况,确保探井测试成功,并取全取准探井测试资料,优化测试管柱结构,形成射孔—测试—排液—酸化解

堵联作管柱,缩短探井测试施工周期,降低海上平台占用率,节约生产时效,减小井控风险,保护油气层,减少污液排放,促进安全环保^[15]。

1 施工难点

GT1井是集团公司海上潜山构造重点风险探井,不仅具有超高温(198℃)、高压(压力系数1.78)、高压气井和井深(5 986 m)的地质特征,而且油层套管、套管头等压力等级均为70 MPa,油层套管非气密封扣型,一旦发生泄漏,极易出现B/C环空带压,海上平台试油安全风险高,环境保护压力大,作业费用高,物资供应难度大。

目的层沙河街组,储层埋藏深,地层温度高,基质孔隙度0.9%~23%,基质渗透率0.12~4.9 mD,含水饱和度33.2%~100%,物性(孔、渗、饱)差距较大,岩性复杂,非均质性强,需要进行分段解堵,笼统酸化解堵无法到达地质要求。

该井属于区块第二口重点风险探井,根据地质资料要求,需要取全取准目的层样品、产能、地层原始压力以及压力恢复曲线等原始储层现场资料,对资料的录取精度要求较高。

该井位于辽东湾北部海域,冬季十一月开始结冰,冰冻期长达4个月,地面主体设备(分离器、热交换器等)、井下测试工具等基本达到适用极限,设备性能保障困难。各流程、设备控制系统、指示系统此低温下很难预防冻堵,可靠性难以保障,根据生产施工难点及运行周期,亟需开展工艺优化,保障施工安全。

2 管柱结构及施工工艺

针对GT1井探井测试施工难点、地面设备、井下工具耐低温以及生产运行周期等影响,以降低探井测试成本、缩短测试施工周期、保护油气层和保障探井测试酸化解堵施工安全,设计射孔—测试—排液—酸化解堵一体化管柱结构(见图1)。

该一体化管柱施工工序及工艺特点:

施工工序:

(1)下入测射联作管柱,校深,坐封管柱,验封合格。

(2)油管加压射孔,能喷则自喷测试,不喷则连续油管氮气诱喷测试。

(3)开井测试求产、关井测压力恢复。

(4)油管挤注酸液,酸化解堵。

(5)关井反应,开井放喷排液。

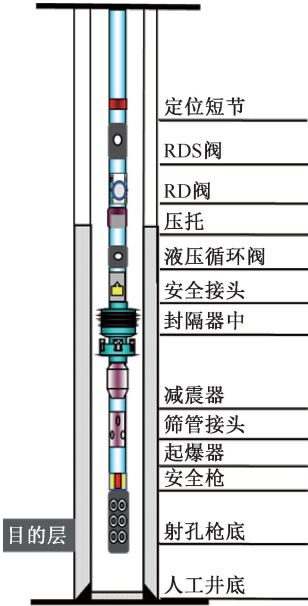


图 1 射孔-测试-排液-酸化解堵一体化管柱结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the integrated pipe string structure

(6) 环空加压关闭 RD 安全阀, 井下关井测压力恢复, 录取地层测试资料。

(7) 打开 RD 循环阀替压井液, 解封测试封隔器, 循环压井, 测后效, 起管柱。

注水泥封层。

工艺特点:

(1) 正压射孔。优化管柱结构, 采用正压射孔, 取消传压管及传压接头, 确保管柱无缩颈, 解决酸液流通通道, 减小酸液解堵施工时摩阻, 保障解堵施工安全性。

(2) 测试排液。油管打压射孔开井测试排液, 自喷则求产, 落实产能液性, 不喷下连续油管氮气气举, 解堵前采用地面关井测地层压力恢复资料, 解堵后利用井下关井阀, 采用井下关井, 求取地层压力恢复资料。通过对比分析实测酸化前后压力恢复曲线, 判断解堵效果。

(3) 酸化解堵。提高作业效率, 根据储层物性及岩性特点, 提前开展酸液配伍试验, 优选自生酸, 解决海上危化品运输的难题。针对储层孔隙度、渗透率差异大、层数多的难题, 采取对物性相对较好的层位进行暂堵转向, 提高解堵效果。通过暂堵转向作业, 减少排液、起下管柱时间, 减少污液处理费用, 提高生产效率的同时降低了作业成本。

3 管柱力学校核

一体化管柱受井下内压、外压、轴向力以及温度变化的影响下, 尤其是排液和酸化解堵过程中, 井下管柱产生轴向变形, 管柱会伸长或缩短。管柱发生轴向变形较大会引起封隔器失封, 螺旋屈曲变形较大会造成管柱塑性破坏, 管柱弯曲、错断等造成管柱失封。选择放喷测试、关井、储层改造等工况进行管柱力学校核, 并通过管柱力学校核判断油管和封隔器在各工况下的受力情况(见图 2、图 3)。油管形变量及封隔器在不同工况下的载荷均在信封曲线以内, 能够满足各工况下施工安全作业(见表 1)。

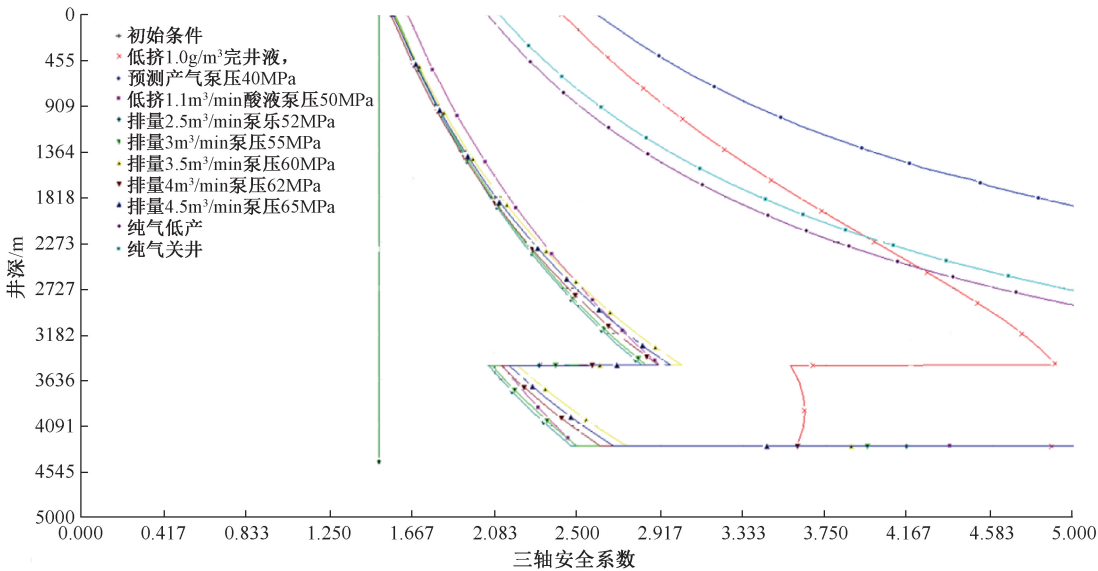


图 2 各工况下封隔器以上管柱三轴应力安全系数分布图
Fig. 2 Distribution diagram of triaxial stress safety factor of the pipe column above the packer under various working conditions

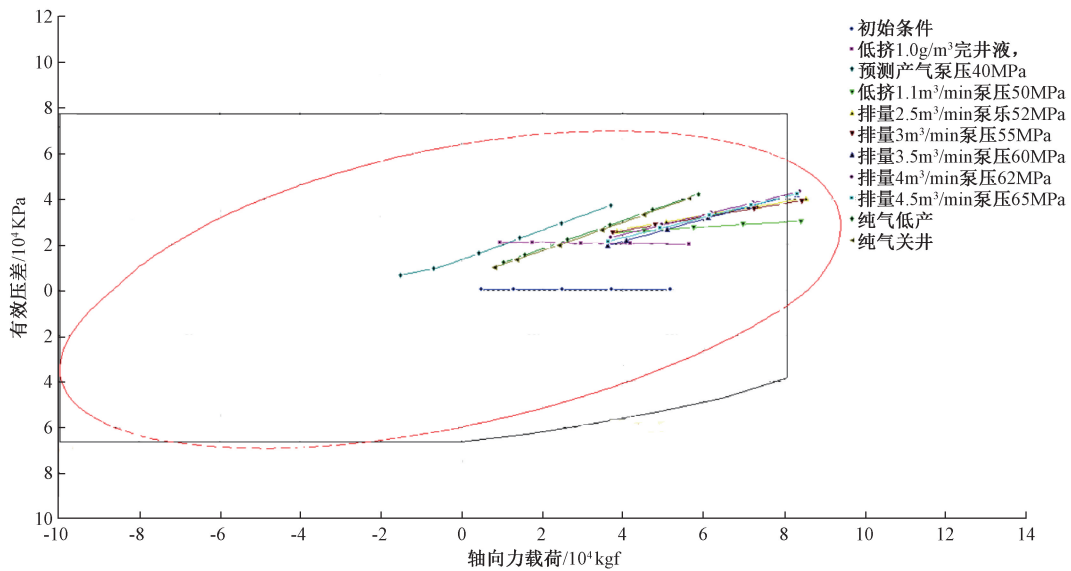


图 3 油管三轴应力载荷

Fig. 3 Triaxial stress load of oil pipe

表 1 管柱变形数据表

Table 1 Column deformation data table

载荷工况	深度/m		轴力效应	屈曲效应	膨胀效应	温度效应	总和
	顶部	底部	/m	/m	/m	/m	/m
初始条件	0.03	4 300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
低挤 1.0 完井液	0.03	4 300	0.567	0.000	-0.567	0.000	0.000
预测产气泵压 40	0.03	4 300	-1.778	-0.161	-0.393	2.332	0.000
低挤 1.1 酸液泵压 50	0.03	4 300	3.924	0.000	-0.748	-3.176	0.000
排量 2.5 泵压 52	0.03	4 300	4.079	0.000	-0.902	-3.177	0.000
排量 3 泵压 55	0.03	4 300	3.970	0.000	-0.793	-3.177	0.000
排量 3.5 泵压 60	0.03	4 300	3.818	0.000	-0.687	-3.131	0.000
排量 4 泵压 62	0.03	4 300	3.910	0.000	-0.775	-3.135	0.000
排量 4.5 泵压 65	0.03	4 300	3.829	0.000	-0.699	-3.130	0.000
纯气低产	0.03	4 300	0.764	0.000	-0.764	0.000	0.000
纯气关井	0.03	4 300	0.472	0.000	-0.562	0.091	0.000

综合各种控制参数计算:

(1)该管柱组合在空气中的最低抗拉安全系数为 2.08,最低剩余拉力 659 kN;在密度 1.63 g/cm³ 钻井液中的最低抗拉安全系数为 3.23;管柱抗拉强度满足正常作业要求。

(2)测试排液期间,监测环空压力,环空压力为零,封隔器以上管柱三轴应力安全系数在 1.50 以上;测试工况中温度效应导致的管柱变形量(伸长)为 0~3.17 m,在允许安全范围内,封隔器坐封后不宜释放过多悬重。

(3)储改工况需环空施加不低于 10 MPa 平衡压力,挤注密度 1.6 g/cm³ 压井液压井、套压 0 MPa 时最高泵压不能超过 77 MPa,确保测试管柱三轴应力安全系数大于 1.5。

4 射孔参数校核

根据 GT1 井射孔段管柱动力强度安全性分析

所需关键参数包括射孔弹参数、射孔段套管参数、射孔段油管参数、封隔器参数、施工参数、储层参数和地层温度等,开展射孔段管柱强度安全性分析。

依据射孔爆轰校核根据有限元分析结果,结合自研软件对油管在射孔过程中的安全校核结果如下:

(1)油管受到最大压力为 79.99 kN,螺旋屈曲安全系数为:2.29;油管未发生螺旋屈曲。

(2)油管受到最大轴向拉力约为 193.95 kN,抗拉安全系数为:6.54;油管未被拉断。

5 现场应用情况

对 GT1 井进行射孔-测试-排液-酸化解堵一体化工艺,采用 TCP+APR+连续油管氮气排液+酸化解堵一趟管柱实现射孔、测试、排液、解堵等联合作业,同时取全取准井下压力压力恢复资料、地层流体及气样,节约了生产运行时间,降低了井控风险,解决了渤海湾海上探井测试、措施改造施工难点。

将本层测试解堵前、解堵压后以及排液后的三次关井所解释得到的地层参数进行对比后发现:

(1) 导流导压能力评价

从实测压力曲线图看,解堵前,开井自然流动时压力上升极其缓慢,解堵后地层能自喷,但流压下降迅速,采用气举措施后天然气瞬时产量气由 $1\,416\text{ m}^3/\text{d}$ 上升至 $4\,440\text{ m}^3/\text{d}$ 。后停止注氮,地面关井,液面恢复 $3\,039\text{ min}$, 8 mm 油嘴求产,平均气产量 $76\,036\text{ m}^3/\text{d}$,但油套压力下降较快,可见地层的持续供液能力差。

排液后地面关井,压力恢复曲线呈现缓爬坡形态,至关井末期压力仍然处于未稳定状态,且与原始地层压力相比降低明显,可见地层的导压能力也较差。

(2) 近井筒储层污染程度评价

三次关井所测得表皮系数分别为 0.596 、 -0.097 、 -0.4256 ,由上述参数中可知,解堵前,本井存在轻微污染,而经过解堵以及排液后,其表皮系数与解堵前相比存在明显下降,排液后经过计算其表皮系数为 -0.4256 ,由此表明本次解堵较为成功。

(3) 储层渗流能力评价

将排液后渗透率与解堵前进行对比,发现本层解堵前渗透率为 $0.0026 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,而排液后渗透率为 $0.139 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,表明渗流能力经解堵后有着明显提高。通过解堵剂注入后关井反应阶段的数据分析,表明储层呈现出裂缝特征,表明本次解堵见效,解释见图4、图5、图6。

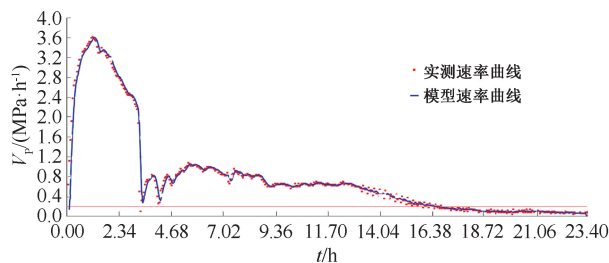


图4 一关井速率拟合图

Fig.4 Shut-in rate fitting

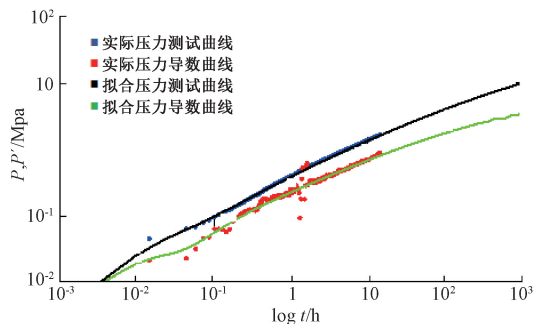


图5 二关井双对数拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of double logarithm derivative of two shut-in

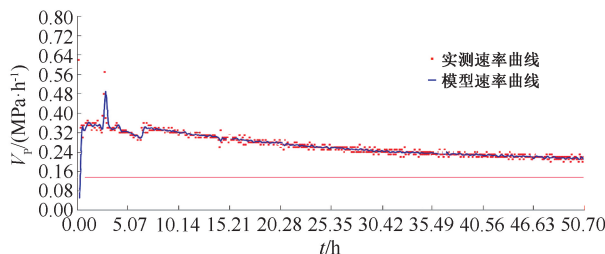


图6 三关井速率拟合图

Fig.6 Fitting chart of three shut-in rate

6 结论

(1) 针对 GT1 井海上探井测试施工难点及运行周期安排,优选射孔-测试-酸化解堵-排液四联作管柱结构及施工工艺。一趟管柱实现射孔、测试、排液、酸化解堵等作业,取全取准了地质资料,解决了 GT1 井探井测试施工难点。

(2) 通过对测试解堵前、解堵压后以及排液后三次关井所解释得到的表皮系数分别为 0.596 、 -0.097 、 -0.4256 进行对比后发现,暂堵转向解堵作业,对该目的层解堵效果良好,与常规试油工艺相比,缩短试油周期 6 d ,提高生产效率 35% ,生产污水回收减少 260 m^3 ,为后期该类施工作业提供技术支持。

(3) 通过该项目的成功实施,GT1 井施工所采用的一体化工艺技术,节约了生产运行时间,解决了渤海湾海上探井测试、措施改造施工难点,对渤海湾探井施工探井测试作业具有一定的指导意义。

致谢:感谢海洋工程有限公司领导、同事在论文编写、修改过程中给出的建议。

参考文献

- [1] 何登发,贾承造,赵文智,等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50 (6): 1162-1172.
HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, et al. Research progress and key issues in the field of ultra deep oil and gas exploration in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50 (6): 1162-1172.
- [2] 李阳,薛兆杰,程喆,等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development direction of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (1): 45-57.
- [3] 邱楠生,刘雯,徐秋晨,等. 深层-古老海相层系温压场与油气成藏[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3511-3525.
QIU Nansheng, LIU Wen, XU Qiuchen, et al. Temperature

- and pressure fields and oil and gas accumulation in deep ancient marine strata [J]. *Earth Science*, 2018, 43 (10): 3511-3525.
- [4] 关晓东,郭磊. 深层—超深层油气成藏研究新进展及展望[J]. *石油实验地质*, 2023, 45 (2): 203-209.
GUAN Xiaodong, GUO Lei. New progress and prospects in the study of deep to ultra deep oil and gas reservoir formation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45 (2): 203-209.
- [5] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39 (2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39 (2): 129-136.
- [6] 李建忠,陶小晚,白斌,等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 52-67.
LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution, and favorable exploration directions of ultra deep marine oil and gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48 (1): 52-67.
- [7] 苏义脑,路保平,刘岩生,等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42 (5): 527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Current status and suggestions for drilling and completing deep and ultra deep wells on land in China [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42 (5): 527-542.
- [8] 陈超峰,江武,米红学,等. 高温高压深井测试技术在准噶尔盆地高探 1 井的应用[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(2): 119-122.
CHEN Chaofeng, JIANG Wu, MI Hongxue, et al. Application of HTHP deep well testing technology in Gaotan Well 1 in the Junggar basin [J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43 (2): 119-122.
- [9] 陈超峰,张一军,李强,等. 高温高压储层“光油管”试油压裂一体化工艺[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(3): 113-118.
CHEN Chaofeng, ZHANG Yijun, LI Qiang, et al. Integrated technology of “light oil pipe” oil testing and fracturing for high-temperature and high-pressure reservoirs [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51 (3): 113-118.
- [10] 温杰文,林轶斌,潘登,等. 分段酸化—测试—完井一体化管柱在双探 2 井的应用[J]. *油气井测试*, 2016, 46 (3): 46-48.
WEN Jiewen, LIN Yibin, PAN Deng, et al. Application of segmented acidification testing completion integrated string in Shuangtan 2 well [J]. *Well Testing*, 2016, 46 (3): 46-48.
- [11] 潘登,徐茂荣,黄船,等. 射孔—酸化—测试—封堵及完井一体化工艺技术[J]. *钻采工艺*, 2014, 37(1): 8-10.
PAN Deng, XU Maorong, HUANG Chuan, et al. Integrated process technology of perforation acidification testing sealing and completion [J]. *Drilling & Production Technology*, 2014, 37 (1): 8-10.
- [12] 邹洪岚,汪绪刚,张福祥,等. 异常高压超深气藏超正压射孔与醇基缓速酸化联作技术研究[J]. *石油钻采工艺*, 2005, 18(1): 38-41.
ZOU Honglan, WANG Xugang, ZHANG Fuxiang, et al. Research on the combined technology of ultra-high pressure perforation and alcohol based slow acid acidification in abnormally high pressure and ultra deep gas reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 18 (1): 38-41.
- [13] 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. Optimization configuration and application of testing string for high-temperature and high-pressure gas wells in front of Kuche Mountain [J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39 (5): 42-45.
- [14] 程青松,周进,胡开银,等. APR 测试工具在高温及高压差作业条件下的改进与应用[J]. *油气井测试*, 2023, 32(2): 13-18.
CHENG Qingsong, ZHOU Jin, HU Kaiyin, et al. Improvement and application of APR testing tools under high temperature and high pressure differential operating conditions [J]. *Well Testing*, 2023, 32 (2): 13-18.
- [15] 刘延鑫,王早祥,侯乃贺,等. 深井试油管柱力学分析及其应用[J]. *钻采工艺*, 2012, 35(4): 71-73.
LIU Yanxin, WANG Hanxiang, HOU Naihe, et al. Mechanical analysis and application of deep well test tubing string [J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35 (4): 71-73.

编辑 吴志力

第一作者简介:庞振力,男,1982 年出生,高级工程师,本科,2008 年毕业于重庆科技大学石油工程专业,主要从事现场试油测试施工、试井资料解释工作及油气藏研究。电话:022-25832701,18202209362。Email: pangzli01. cpoe@ cnpc. com. cn。通信地址:天津滨海新区石油科技大厦五楼中石油海洋天津分公司技术中心,邮政编码:300451。