

雅达瓦兰油田“四高”油气井完井测试工艺技术

李加明, 黄天朋, 金强

中国石油化工股份有限公司华东油气分公司采油气工程服务中心

通讯作者:Email:ljm155@163.com

引用:李加明,黄天朋,金强. 雅达瓦兰油田“四高”油气井完井测试工艺技术[J]. 油气井测试,2019,28(1):25-31.

Cite: Li Jiaming, HUANG Tianpeng, JIN Qiang. Completion test technology for "four-high" wells in Yadavaran Oilfield[J]. Well Testing, 2019,28(1):25-31.

摘要 雅达瓦兰油田 Fahliyan 层属于高温、高压、高产、高含硫化氢的“四高”油藏,完井测试过程存在测试工具选择难、测试管柱受力复杂、地面测试流程要求高、测试风险系数大等技术难题。针对该类型油藏,优选 127mm APR 测试工具、防硫气密封油管、防硫井口装置、地面测试流程及高温防硫密封圈,优化射孔测试管柱,形成了射孔测试酸化联作、地面测试及安全监测与控制的油气井测试工艺技术。利用该技术在雅达 A 井试油,获得日产原油 1 020.0 m³、日产天然气 12.0×10⁴ m³,并取得了完整的地层参数。后期在该油田 Sarvak 层和 Fahliyan 层开展 23 层次测试,综合成功率达到 96%。该技术可为提高海外类似“四高”油藏的试油速度和试油效果提供有力技术支撑。

关键词 雅达瓦兰油田; 高温高压; 高产; 硫化氢; 试油; 地层测试; 射孔联作; 地面计量

中图分类号:TE27 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.005

Completion test technology for "four-high" wells in Yadavaran Oilfield

LI Jiaming, HUANG Tianpeng, JIN Qiang

Oil and Gas Production Engineering Service Center, East China Company, SINOPEC, Taizhou, Jiangsu 225300, China

Abstract: The Fahliyan Formation in Yadavaran oilfield is a "four-high" (high temperature, high pressure, high yield and high content of H₂S) reservoir. Many technical problems exist in the completion test in this reservoir, such as difficult selection of test tools, complex stress of test string, high requirement for surface test flow, and large test risk coefficient. This paper proposed a well test technology consisting of perforating, testing and acidizing integration, surface test, and safety monitoring & control, which combines optimal 127 mm APR test tool, sulfur-proof gas seal tubing, sulfur-proof wellhead device, surface test flow and high-temperature sulfur-proof sealing ring, as well as optimal perforation and testing string. This technology was used in Well Yada A, revealing the daily oil production of 102 m³ and daily gas production of 12×10⁴ m³, with complete formation parameters obtained. Later, this technology was applied in 23 tests in the Sarvak Formation and Fahliyan Formation, showing a comprehensive success rate of 96%. This technology can provide a strong support for improving the testing speed and effect in similar "four-high" reservoirs overseas.

Keywords: Yadavaran oilfield; high temperature and high pressure (HTHP); high yield; H₂S; oil test; formation test; perforating, testing and acidizing integration; surface metering

雅达瓦兰油田为整装大型油田,油田从上至下有两个主要含油气层,即 Sarvak 层和 Fahliyan 层,其中 Sarvak 储层属早白垩纪浅海碳酸盐岩,油层总厚度 270.0 m,平均井深 2 900.0 m;Fahliyan 储层主要为早白垩纪鲕粒-粒状石灰岩,层厚 600.0 m,平均埋深 4 500.0m^[1]。国内对复杂油气井测试的研究重点大多集中在高温、高压或高含硫油气井,^[2-4]对同时具备本文提及的四种高风险情况鲜有涉及。区块前期测试资料表明,Fahliyan 储层压力系数在 1.4~1.6 之间,地层温度 132~151℃,原油产能 160

~1 500 m³/d,天然气产能 6×10⁴~30×10⁴ m³/d,硫化氢含量 2 000~40 000 ppm,属高温、高压、高产、高含硫化氢的“四高”油藏^[5-6]。该区块在前期测试中受“四高”特性影响,测试成功率较低,主要存在以下几个方面的问题:(1)高温:影响橡胶件密封及射孔火工品使用性能,降低测试工具的结构强度,测试流动及关井恢复期间的温度场变化造成较大的测试管柱受力变化而发生测试管柱弯曲变形、断裂^[7];(2)高压:削弱了测试管柱的密封性能,封隔器容易失封,井口容易发生失控,极易造成测试失

败及人身伤害和设备损坏;(3)高产:对地面测试过程中的油、气、水处理技术要求高。井下地层测试工具易发生损坏,高速油气流携带固相颗粒冲蚀地面测试流程。酸压前后产量变化大,制定系统测试方案难度大;(4)高含硫化氢:对井下工具和地面测试设备产生腐蚀,导致管材、设备和工具腐蚀开裂、减薄、穿孔,浸润橡胶密封件导致密封失效^[8-9]。

本文主要针对以上四点对 Fahliyan 层测试工艺技术开展研究,从设备选型、工艺优化等方面入手,探索出一套适用于该区块油气藏测试的方法,并在实践中取得良好效果。

1 射孔、测试工艺技术优化

TCP+DST 联作是目前国、内外较理想的完井测试方法之一^[10]。它可以在短时间内取得动态条件下地层和流体的多项物性参数,可以及时准确地认识评价新油藏,降低勘探、试油成本,科学指导增产措施,提高经济效益。

1.1 射孔工艺技术优化

射孔工艺技术优化包括射孔器材的优选、射孔工艺方法选择两方面。

1.1.1 射孔器材的优选

(1)射孔枪选择

Fahliyan 地层油气井井身结构多数采用三级 244.5 mm+178 mm+114 mm 套管组合,高压油层部位采用 114 mm 套管,综合考虑固井过程中套管内壁可能的泥浆残留、井筒倾斜因素、射孔枪毛刺和射孔爆轰形变,导致射孔后卡枪等问题,对于 114 mm 套管井段,从安全角度出发,选择 73 mm 射孔枪,射孔枪抗内压 120 MPa,尽可能减小了射孔后枪的膨胀性和毛刺高度。

(2)射孔弹选择

射孔弹性能选择应根据储层平均污染深度估计来进行,并与射孔枪的尺寸匹配。114 mm 套管井段适合的射孔弹为 73 弹;178 mm 套管井段选用 127 枪弹。根据射孔弹装药类型与井下滞留时间的关系,RDX 射孔弹在 125 ℃ 下最大滞留时间为 10 h;HMX 射孔弹在 150 ℃ 下耐温 100 h。对于地层温度超过 150 ℃,选择 HTX 或 HNS 等更高级别抗高温射孔弹。

(3)射孔参数优化

Fahliyan 地层钻井污染深度一般在 250 mm,通过各厂家 73 弹混凝土靶穿深实验数据^[11],优选川

南 DP30HMX-34(73)射孔弹,穿深 644 mm,孔径 8.10 mm,配套川南 73 射孔枪,射孔相位角采用 60°螺旋布孔,孔密 20 孔/m,射孔负压 10~20 MPa,满足 Fahliyan 储层 114 mm 套管井段射孔完井要求;178 mm 套管井,优选 127 枪弹,40 孔/m,耐压 140 MPa,穿深 1 260 mm,孔径 $\phi 12.0$ mm。

1.1.2 射孔工艺方法选择

根据前期测试资料分析,Fahliyan 地层压力系数通常都在 1.40 以上,测试液垫采用清水即能达到测试需求的负压值。Sarvak 层相对较浅、压力系数相对较低,一般在 1.2 左右,可采用柴油作为液垫^[12]。这样,所有测试层的测试压差都能在一个合理的范围内。

采用双火药延时点火头、井口正加压 15 MPa 停待 2 min 确保延时点火头起爆,井口卸压,火药延时 10 min,引爆射孔枪,达到负压射孔目的。

1.2 联作测试管柱结构优化

根据已掌握的地质及工程资料,联作测试中选择合适的油管、测试工具,以及进行管柱结构的设计、优化,能够更好的完成测试施工,并保障施工安全。

1.2.1 测试油管选择

“四高”油藏井测试如果采用普通 API 油管,存在三个方面问题:一是 API 圆丝扣油管丝扣不能承受高温、高压而出现泄漏,或当油管受弯曲时,出现严重的丝扣泄漏;二是油管拉伸导致油管断脱而发生泄漏;三是酸蚀气体会对管材产生腐蚀,腐蚀点首先在油管内壁形成,并不断向四周扩展形成局部腐蚀坑,腐蚀坑在腐蚀溶解和流体冲刷的双重作用下形成沟槽,不断向纵深腐蚀,直至管壁发生穿孔泄漏。

优选 89 mm 抗硫材质 Vam Top 扣油管为测试油管,能够满足该区域测试生产要求。其密封原理为:螺纹靠圆锥体的过盈配合产生线接触,起着主密封作用,端面的紧密接触起着辅助密封作用,斜梯形的丝扣起连接作用和辅助密封作用,从而确保了油管的密封性能。

1.2.2 测试工具选择

目前主要使用的有 MFE、HST、APR 三种地层测试工具:通过上提下放管柱实现测试阀开与关的 HST、MFE 地层测试器主要用于裸眼井,以及低产套管井的测试作业;APR 工具通过环空加压、卸压来实现井下开、关井,主要用于高压、高产套管井的测试作业。

127 mm 防硫 APR 与 127 mm 防硫 MFE 工具相比,具有如下优点:一是 APR 内通径达 57 mm,远远大于 MFE 内通径 25 mm,减缓了井底节流,减小了地层流体阻力,且能防硫化氢侵蚀,特别适用于高产含硫油气井测试;二是开、关井不动管柱,保证了井口安全;三是一趟管柱可以进行生产试井多项钢丝作业,测试管柱能下入挠性油管进行挤酸排液作业。

国内、外公司在进行“四高”油藏测试时都是采用 APR 测试工具,本区域优选 EE 级防硫 127 mm APR、178 mm RTTS 等系列全通径测试工具^[13],密封圈选用进口的哈里伯顿 600 系列的高温、抗硫密封件。

1.2.3 射孔-测试-酸化联作管柱结构设计

“射孔-测试-酸化”联作技术,已成为高温、高压、高含硫油气田勘探过程中的关键技术之一。管柱设计从操作方便、灵活,以及安全的功能着手,同时还需要具备取全取准资料、排液和储层保护的特点。

通过工具对比分析,优化出一套适合于“四高”井的测试管柱^[14]。其管柱结构自上而下为:气密封扣抗硫油管+伸缩节+钻铤+RD 循环阀+放射性定位接头+钻铤+压力计托筒+RD 安全循环阀+滑套式放样阀+LPR-N 阀+压力计托筒+RD 取样器+液压循

环阀+BJ 震击器+RTTS 安全接头+RTTS 封隔器+减震器+筛管+压力延时点火头+射孔枪+压力延时点火头+枪尾。

优化的管柱能够实现以下功能:(1)满足了射孔、测试工况下的强度要求和高温、高含硫化氢腐蚀环境下的密封防腐要求;(2)优选 RTTS 封隔器,保证了封隔器在高温、大压差下能够长时间不失封,便于射孔后酸压施工;(3)RD 循环阀和液压旁通阀均具有下井过程中平衡封隔器上下压差,建立循环通道,保护胶筒,便于解封;(4)伸缩节能够补偿调节管柱受热膨胀的伸长量,保证测试管柱的安全;(5)纵、径向双减震器的使用有效降低了射孔枪起爆时对管柱的震动,保护了压力计,保证封隔器的密封性能。

1.3 测试管柱参数优化

高压油气井测试管柱一般需进行强度校核,综合考虑井内流体、井下工具耐压能力、套管强度,以及井下测试管柱在不同工况下受到的温度、膨胀、活塞、弯曲等效应引起的管柱变形^[15],运用 FTEDMS 测试工程辅助决策软件或 Landmark 软件系统对测试管柱进行强度校核,保障测试管柱安全。在假设的井下条件下,使用 Landmark 软件分别对 114 mm 和 89 mm 油管的抗拉、抗外挤、抗内压进行校核(表 1)。

表 1 油管强度校核参数及结果									
Table 1 Parameters and results of tubing strength calibration									
油管尺寸/ mm	下深/m	钢级	扣型	额定抗压/MPa		额定抗拉/ kN	安全系数		
				抗内压	抗外压		抗内压	抗外压	抗拉
114	4 500	L80	气密	82.8	86.6	1 750	1.65	4.38	5.59
89	4 500	L80	气密	71.1	73.7	922	1.60	1.51	4.11

从表 1 中可以看出,计算得出的 114 mm 和 89 mm 油管抗内压、外压、抗拉安全系数均能满足测试要求。

2 地面测试流程优化

地面测试能够直观的得出地层流体性质以及产量,在测试过程中,可以根据地面测试生产情况对测试方案进行及时优化调整,最大程度的达到施工目的。

2.1 控制头与管汇台

节流降压流程级数的选择主要依据预测最高关井井口压力确定,一般遵循以下原则:①预测最高关井井口压力低于 35 MPa,采用一级管

汇节流控制;②预测最高关井井口压力介于 35 ~ 70 MPa,采用二级管汇节流控制;③预测最高关井井口压力大于 70 MPa,采用三级管汇节流控制。

Fahliyan 测试层井口关井最高压力在 30 MPa 左右,因此一级节流能达到降压测试的目的^[16],应对 4 阀 105 MPa、通径 77.7 mm、HH 级 WOM 控制头及 EE 管汇台进行优选。

2.2 测试流程管线

管线尺寸的确定需结合安全因素考虑。根据抗冲蚀的产能确定管线的合理尺寸,以保证测试流程管线的安全。在入口温度为 20 ℃,相对密度为 0.56 时,三种工况下的放喷管线尺寸计算结果见表 2。

表 2 三种工况下的放喷管线尺寸计算结果
Table 2 Calculation results of relief line size under three working conditions

入口压力/ MPa	管线内径/ mm	通过气量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
2	62	70.23
	76	99.53
7	62	138.82
	76	196.78
10	62	169.43
	76	238.92

由表 2 可见,在不同产能下,采用 89 mm 管线通过气量均远远大于该区块最大预测产量,可以满足工区内放喷测试要求。

2.3 分离器、燃烧器

Fahliyan 储层预测最大油产能不超过 $2\,000.0 \text{ m}^3/\text{d}$,优选哈里伯顿 1 219 mm 三相分离器,工作压力 9.2 MPa、液体处理能力 $2\,210.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 、气体 $184 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、燃烧器处理量 $1\,900.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.4 安全监测与控制

数据采集系统对压力、温度、可燃气体、 CO_2 、 H_2S 等数据进行实时采集,监测井口、分离器压力及有害气体浓度,采用自动报警,全区域视频监控模式^[17]。对监测参数设置上、下限报警,在发生异常时,及时给操作人员警示,避免发生事故。

测试流程设置三级安全控制系统:一级是数

据采集系统,实时记录压力温度监控,并可以实现高、低报警,机械记录井口用压力表和温度计完成,分离器以巴顿记录仪和流量计监测,一级保障能够给操作者直观信号,发现危险情况及时处理;二级是紧急关闭系统(ESD)^[18],确保在异常情况发生时(如来自高、低压感应区,远程 ESD 控制点等)2 s 内,就可截断上游压力源,液压安全阀关闭,切断井内流动,保障测试安全;三是分离器的安全阀和破裂盘对分离器实施过压保护^[19],当出现误操作或自动控制阀运转不正常使分离器超压时,分离器的安全阀打开,卸掉分离器内的压力。由于破裂盘的破裂压力要高于安全阀的开启压力,所以当压力上升过快时,在打开安全阀时击碎破裂盘,两种装置同时卸压,实现对分离器 and 整个测试现场的安全保护。

2.5 地面流程优化

针对雅达瓦兰工区特点,组配了全套 EE 级地面流程^[20],从井口控制头(或采油树)至燃烧器流程均密闭,无任何气体泄露点、泄露隐患位置,高压管线 105 MPa,低压管线 35 MPa。主流程配备全套数采系统、法兰管线、ESD、SSV、105 MPa 油嘴管汇、分离器、化学注入泵、缓冲罐,以及试油放喷排液流程。优化的地面测试流程由井口控制系统、节流系统、分离系统、计量系统、数采系统等组成(图 1)。

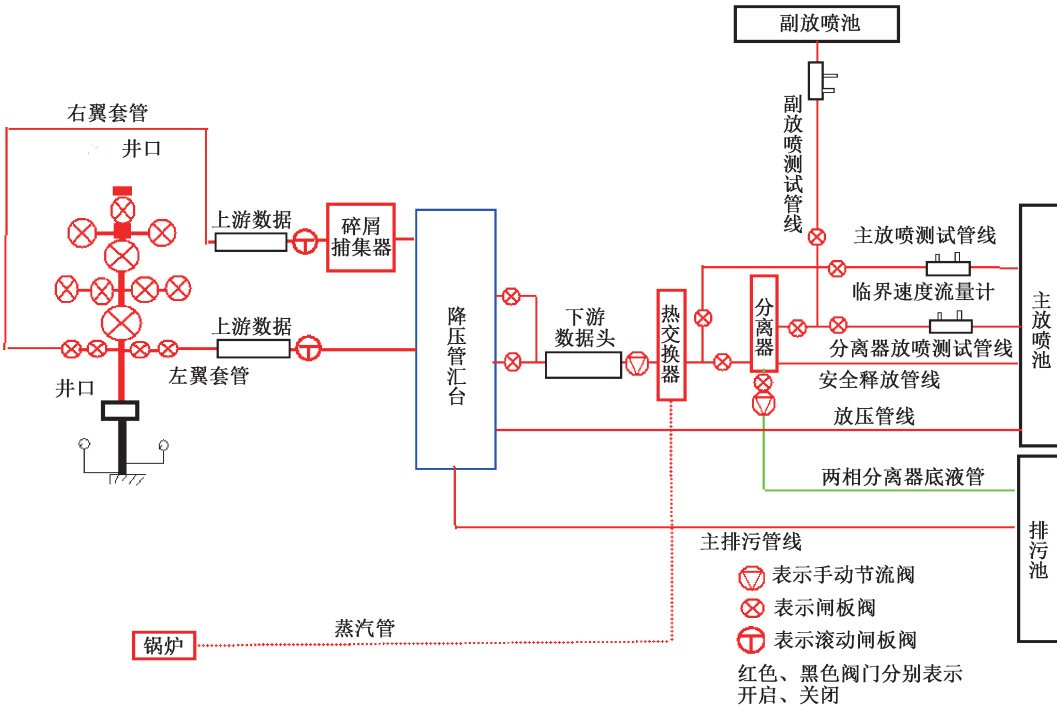


图 1 地面测试流程示意图
Fig.1 Surface test flowchart

3 现场应用

A 井为雅达瓦兰油田的一口探井,自上而下为三级套管结构^[21-22],分别为:244.5 mm 套管,下深 1 677.62 m;178 mm 套管,下深 4 239.5 m;114 mm 套管,下深 4 717.0 m。RTTS 封隔器坐封位置 4 120.90 m,完井液密度 1.7 g/cm³。在该井4 338.0 ~4 356.0 m,采用 TCP+APR 联作测试技术进行测试。设计测试管柱^[23]自上而下为:控制头+油管+伸缩节+钻铤+RD 循环阀+放射性定位接头+钻铤+RD 安全循环阀+压力计托筒+LPR-N 阀+RD 取样器+压力计托筒+液压循环阀+BJ 震击器+RTTS 安全接头+RTTS 封隔器+减震器+筛管+压力延时点火头+射孔枪+压力延时点火头+枪尾。地面测试流程如图 1 所示,由井口控制系统、节流系统、分离系统、计量系统、数采系统等组成。为确保测试管柱安全,封隔器选用 178 mmRTTS,悬挂在 178 mm 套管内;预测地层压力系数 1.5、温度 140 ℃,测试液垫采用清水至井口,测试压差可达 20 MPa;选用 73 枪、HMX 火药 73 射孔弹、孔密 20 孔/m、60°螺旋布孔、双延时液压起爆射孔工艺;工作制度的选择结果为二开二关;根据测试产能情况,决定储层是否采取酸化改造方案。本井所测试的卡片如图 2 所示。

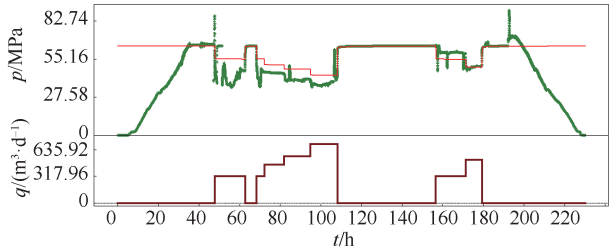


图 2 A 井联作测试压力史
Fig.2 Integrated test card for Well A

从图中压力曲线可以看出,测试过程中,各工作制度记录清晰,有明显的坐封、开关井动作。测试工艺技术取得成功。二开井后,地面 16 mm 油嘴试获原油 700.0 m³/d,下入挠性油管酸化后,原油产量达到 1 020.0 m³/d、天然气产量 12×10⁴ m³/d,压力系数 1.56,硫化氢含量 40 000 ppm,测试解释成果见表 3。

图 3 和图 4 是采用 Saphir 4.02 软件得到的双对数曲线和半对数曲线。从双对数曲线上可以看

出,测试后期,曲线已经出现径向流段。从半对数计算出的表皮系数为 31.3 表明,地层存在较大污染,后下入挠性油管酸化解堵,表皮系数降为-2,原油产量也得到较大幅度提升。

表 3 A 井测试解释成果数据表

Table 3 Results of test interpretation for Well A

项目	参数	解释结果	备注
测试产量	油/(m ³ ·d ⁻¹)	700(酸前),1020(酸后)	-
	天然气/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	12	
压力	实测最大压力/MPa	64.88	压力计深度 4 107.0 m
	外推压力/MPa	65.03	
	地层压力/MPa	66.61	一关井拟合
	压力系数	1.56	压力计算
温度	地层温度/℃	139.25	地层中部深度 4 347.0 m
	地温梯度/(℃/100 m)	3.2	
地层参数	流动系数/(mD·m·(mPa·s) ⁻¹)	253.3	
	有效渗透率/mD	91.2	-
	表皮系数	31.3(酸前),-2(酸后)	

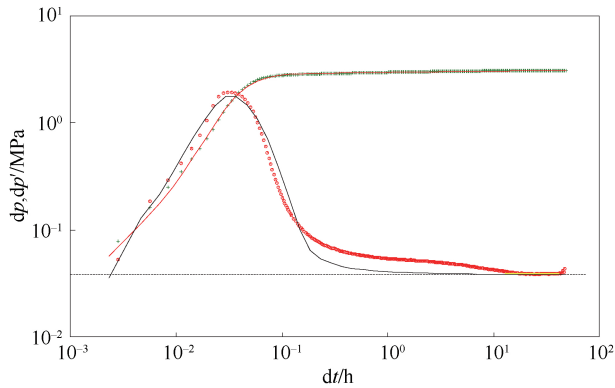


图 3 A 井双对数曲线图
Fig.3 Log-log plot of Well A

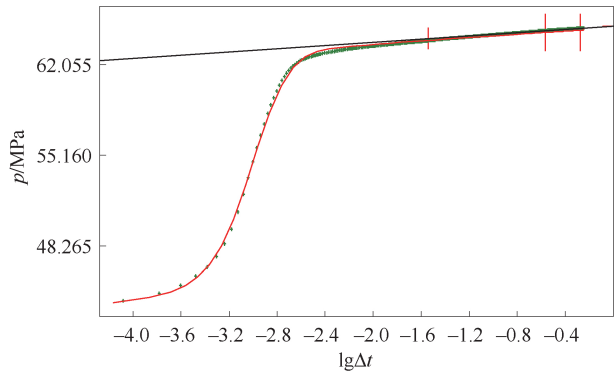


图 4 A 井半对数曲线图
Fig.4 Semi-log plot of Well A

雅达瓦兰油田 Sarvak 层和 Fahliyan 层先后开展 23 层次测试,其中采用“TCP+DST 联作”测试 11 井次、DST 单测试 12 井次,综合成功率达到 96%。

4 结论

(1) 根据“四高”油气井的测试难点, 优选出 127 mm APR 测试工具、防硫气密封油管、防硫井口装置、地面测试流程及高温防硫密封圈。经过 23 井次的现场应用表明, 能够克服“四高”油气井的测试难点, 满足测试要求。

(2) 优化的射孔测试管柱保证了 RTTS 封隔器在高温、大压差下能够长时间不失封; 射孔采用的双压力延时点火头, 井口正加压方式, 使现场射孔率达到 100%。

(3) 从卡片测试结果分析, 雅达瓦兰油田 Fahliyan 地层的压力系数 1.4 ~ 1.57, 温度 132 ~ 151 °C; 地面求产获得日产原油 300.0 ~ 1 200.0 m³, 天然气日产量 10.0 × 10⁴ ~ 15.0 × 10⁴ m³, 硫化氢 2 000 ~ 40 000 ppm, 证实该区域油藏为高压、高温、高产、高含硫化氢油气层。

(4) 从测试求产结果分析, 前期未进行酸化处理的油气井表皮系数在 31 ~ 65, 表明储层钻井泥浆污染较严重。后期所有测试井二开后, 即对产层进行酸化改造, 表皮系数降为 -3 ~ -1, 产层近井附近堵塞解除, 油气产能明显提高。

(5) 地面流程中的远程数据采集及监测控制系统的应用, 确保了操作人员、设备的安全。

致谢: 感谢威诺公司雅达项目部提供试验井组及对人员设备的支持。

参考文献

- [1] 何汉平, 吴俊霞, 黄建林, 等. 伊朗雅达油田完井工艺[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 26-30.
HE Hanping, WU Junxia, HUANG Jianlin, et al. Well completion technique in Yada Field in Iran [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(4): 26-30.
- [2] 徐鹏海, 张莎, 杨双宝, 等. 高压裸眼油气井钻采一体化井口大四通装置[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 33-38.
XU Penghai, ZHANG Sha, YANG Shuangbao, et al. Large four-way device of drilling and production integrated wellhead for high-pressure open-hole oil and gas well [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 33-38.
- [3] 李玉明. 高含 CO₂ 和 H₂S 井测试工艺技术应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 51-52
LI Yuming. Application of well test technology for well high content of CO₂ and H₂S [J]. Well Testing, 2018, 26(5): 51-52.

- [4] 陈华良, 张洋. 塔中高含 H₂S 凝析气井地面测试技术[J]. 油气井测试, 2017, 26(4): 63-65, 69.
CHEN Hualiang, ZHANG Yang. Surface testing technology of Tazhong condensate gas wells with high content of H₂S [J]. Well Testing, 2017, 26(4): 63-65, 69.
- [5] 蔡履忠. 雅达油田测试-酸化联作工艺技术优化及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(3): 58-62.
CAI Lyuzhong. Optimization and application of combination technology of testing and acidizing in Yada Oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(3): 58-62.
- [6] 马升. 油管输送射孔与生产管柱联作工艺技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005.
MA Sheng. Study on the technology of pipe transport perforation and production pipe column making [D]. Daqing Petroleum Institute, 2005.
- [7] 李明文. 川东北地区高温高压含硫天然气深井测试工艺探讨[J]. 油气井测试, 2010, 19(1): 45-49.
LI Mingwen. Discussion of well testing technique in deep wells in sour gas reservoirs with high hydrogen sulfide, high temperature and high pressure in the area of Northeast Sichuan [J]. Well Testing, 2010, 19(1): 45-49.
- [8] 刘伟. 川西含硫气井测试管柱及配套工艺研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
LIU Wei. Study on test pipe string and supporting process of sulfur gas well in Western Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [9] 刘玉芝. 射孔方案优化设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 52-56.
- [10] 董尚富. 射孔-测试-酸化联作工艺应用与分析[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(3): 72-74.
DONG Shangfu. Application and analysis of perforation, testing and acidizing for combined processes [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(3): 72-74.
- [11] 徐玮. 川西地区深层气井 APR 测试管柱受力分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
XU Wei. Stress analysis of APR test tube column in deep gas well in Western Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [12] 刘焕军, 李玉明, 王树霞. APR 工具 LPR-N 阀在大比重泥浆条件下井下故障分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(15): 3545-3548, 3566.
LIU Huanjun, LI Yuming, WANG Shuxia. Downhole failures analysis for LPR-N valve of APR tool in the presence of high specific gravity mud [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(15): 3545-3548, 3566.
- [13] 刘世奇. 高温高压深井试气管柱受力分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2010.
LIU Shiqi. High temperature and high pressure deep well

- test trachea column force analysis [D]. Beijing: China Petroleum University(Beijing), 2010.
- [14] 张广东,陈科,张旭,等. 川东北高温高压高产含硫气井井口装置的优选[J]. 油气井测试, 2011, 20(4):59-62.
- ZHANG Guangdong, CHEN Ke, ZHANG Xu, et al. Preferred sulfur gas wellhead for high temperature, pressure and yield of Northeast Sichuan [J]. Well Testing, 2011, 20(4):59-62.
- [15] 张娟,戴强,张尧. 高温高压含硫气井试油井筒安全风险识别与控制[J]. 天然气工业, 2015, 35(1):120-125.
- ZHANG Juan, DAI Qiang, ZHANG Yao. Identification and control of wellbore safety risks during the well testing of HPHT sulfur gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(1):120-125.
- [16] 贾磊. 关于ESD系统的气井测试中的应用探讨[J]. 石化技术, 2015,22(5):80.
- JIA Lei. Application of ESD system in gas well testing [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015,22(5):80.
- [17] 施霞. 高含硫气井多功能生产辅助流程设计[J]. 中国石油和化工, 2016(S1):319,321.
- SHI Xia. Design of multi-functional production assistance flow for high sulphur gas wells [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2016(S1):319,321.
- [18] 张盼盼. 海上油气井测试地面流程流动仿真与应用[D]. 成都:西南石油大学,2017.
- ZHANG Panpan. Simulation and application of surface flow in offshore oil and gas well test [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [19] 魏殿举,金军斌,何青水. YD油田高渗灰岩储层水平井钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3):23-28.
- WEI Dianju, JIN Junbin, HE Qingshui. Fluid technology for drilling horizontal wells in the high permeability carbonate reservoir of the YD Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3):23-28.
- [20] 张顺元,柳丙善,姜治,等. 伊朗阿扎德干复杂碳酸盐岩油气藏钻井提速技术[J]. 天然气工业, 2016, 36(8):107-115.
- ZHANG Shunyuan, LIU Bingshan, JIANG Zhi, et al. ROP improvement technologies for complicated carbonate oil and gas reservoirs in the Azadegan Oilfield, Iran [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(8):107-115.
- [21] 潘登,胡长翠,贾海,等. 全通径压控测试阀及其应用[J]. 钻采工艺, 2003,26(5):73-75.
- PAN Deng, HU Changcui, JIA Hai, et al. Application of pressure operation test valve (POTV) [J]. Drilling & Production Technology, 2003,26(5):73-75.
- [22] 高辉. 高温高压高产含硫气井测试工程设计[J]. 内蒙古石油化工, 2005(7):37-39.
- GAO Hui. Engineering design of testing in high temperature high pressure high quantity gas wells containing H₂S [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry, 2005(7):37-39.
- [23] 魏军. 深井试油试气测试工艺技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(2):36-38.
- WEI Jun. Research and application in technology of oil & gas testing in deep well [J]. Well Testing, 2010, 19(2):36-38.

编辑 刘振庆

第一作者简介:李加明,男,1970年出生,高级工程师,2008年毕业于中国石油大学(华东)采油工程网络专业,现主要从事油气井测试、射孔作业等方面的工作。电话:0523-86661007,18994602685;Email:ljm155@163.com。通信地址:江苏省泰州市南通路99号油服中心测试项目部,邮政编码:225300。