

复合酸性前置液体系在厄瓜多尔TAMBOCOCHA区块固井中的应用

唐 凯^{1,2}, 潘宇强³, 赵 鹏⁴

(1. 中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油川庆钻探工程有限公司长庆固井公司, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油川庆钻探工程有限公司长庆指挥部, 陕西 西安, 710018)

摘要: TAMBOCOCHA 区块位于厄瓜多尔东部热带雨林地区, 储层砂岩孔隙度大, 渗透率高, 井壁易堆积较厚泥饼, 177.8 mm 套管封固多个油层且存在油水同层。采用常规前置液体系不能有效清除井壁泥饼, 水泥石二界面胶结强度低, 固井质量差, 容易造成层间窜流影响油井产能效率, 缩短油井使用寿命。为此, 研发复合酸性前置液体系, 体系包含冲洗液、酸性冲洗液、隔离液。酸性冲洗液中盐酸与井壁泥饼中碳酸钙反应, 破坏泥饼骨架结构使泥饼松散; 3种前置液交替注入有效提高了泥饼清洗效率; 用隔离液和先导浆将酸性冲洗液和水泥浆有效隔离, 提高了界面胶结质量和封固质量。室内实验表明应用复合酸性前置液体系对泥饼进行清洗, 泥饼冲洗效率可达到96%。

关键词: 固井质量; 胶结强度; 泥饼; 复合前置液; 酸性冲洗液; 冲洗效率

中图分类号: TE256 **文献标志码:** A

Application of compound acid pre-liquid system in cementing of TAMBOCOCHA Block in Ecuador

TANG Kai^{1,2}, PAN Yuqiang³, ZHAO Peng⁴

(1. Research Institute of Drilling and Production Engineering Technology, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an 710018, China; 2. National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development, Xi'an 710018, China; 3. Changqing Well Cementing Division of Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an 710018, China; 4. Changqing Headquarters of Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an 710018, China)

Abstract: The TAMBOCOCHA Block is located in eastern Ecuador's tropical rainforest region. Because of the reservoir sandstone's high permeability and porosity, thick mud cakes are simple to build up on the wellbore. The same layer of oil and water as well as several oil layers are sealed with the 177.8 mm casing string. The mud cake on the well wall can not be removed by using the standard pre-fluid system, and the cementing quality and strength at the cement-stone contact are both substandard. As a result, interlayer channeling is simple to produce, which has an impact on oil well productivity efficiency and shortens their service life. In order to achieve this, a compound acid pre-fluid system is developed that consists of isolating fluid, flushing fluid, and acid flushing fluid. The calcium carbonate in the mud cake on the well wall reacts with the hydrochloric acid in the acidic flushing fluid, destroying the mud cake's skeleton structure and loosening it. The mud cake cleaning efficiency is significantly increased by the alternate injection of three pre-fluids. The spacer fluid and pilot slurry properly separate the cement slurry from the acid-flushing fluid, which enhances the quality of interface cementation and sealing. According to experiment results, the composite acid pre-liquid system can clean the mud cake with an efficiency of 96%.

Key words: cementing quality; cementation strength; mud cake; composite pre-liquid system; acidic flushing fluid; cleaning efficiency

TAMBOCOCHA 区块位于厄瓜多尔东部, 该区块储层渗透率高、孔隙度大、地层流体活跃^[1]。177.8 mm 套管封固多个油层且存在油水同层, 常规前置液体系不能有效清除井壁泥饼, 残留泥饼阻碍水泥浆与井壁直接接触, 影响界面胶结强度及有效

层间封隔。同时泥饼堵塞井壁四周的孔隙, 降低了

收稿日期: 2020-09-17; 改回日期: 2022-05-23。

第一作者简介: 唐凯(1986—), 工程师, 主要从事固井工艺、水泥浆体系等方面的研究开发工作。E-mail: 522219417@qq.com。

储层的渗透率,增加了油气返排压力,导致油气产量降低,不利于储层保护^[2-4]。调研发现复合酸性前置液体系可以解决固井过程中钻井液顶替效率低、井壁泥饼清除困难等问题,有效提高界面胶结质量和环空水泥石密封完整性^[5-7]。针对该地区固井问题,研发了复合酸性前置液体系和施工工艺。通过室内实验对比发现,新体系较普通冲洗液有更好的泥饼冲洗效果。

1 室内实验

1.1 材料和仪器

G 级高抗硫油井水泥(德国 Dyckerhoff 公司)、CXY(冲洗液)、G404SP(隔离剂)、BXF-200L(降失水剂)、BXR-200L(缓凝剂)、BCT-800L(胶乳)、EXC-13(膨胀剂)、CA-3(防窜剂)、SMSS-44L(厄瓜多尔 INCOPET 公司阴离子表面活性剂)、G603(消泡剂)、D50(抑泡剂)、G432(稳定剂)、石灰石粉(厄瓜多尔 INCOPET 公司)、氯化钾(厄瓜多尔 INCOPET 公司)、质量分数 15% 盐酸(厄瓜多尔 INCOPET 公司)、岩心(规格为长度 50.8 mm,直径 25.4 mm,厄瓜多尔 JOHANNA 区块 M1 层岩心,渗透率 $680 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、水样(TAMBOCOCHA 油田现场水样)。

1200 型常压稠化仪(美国 CHANDLER 公司)、8240 型增温增压稠化仪(美国 CHANDLER 公司)、5265 型静胶凝强度分析仪(美国 CHANDLER 公司)、3260 型恒速搅拌器(美国 CHANDLER 公司)、ZNN-D6 型六速旋转黏度计(青岛恒泰达)、OWC-9710 高温高压失水仪(沈阳航空航天大学应用技术研究)、WHY-300/10 型压力试验机(上海华龙测试仪器股份有限公司)、胶结强度测试养护模具(自制)。

1.2 实验方法

按照 GB/19139-2012《油井水泥试验方法》制备水泥浆,按此标准测定水泥浆密度、失水量、抗压强度、静胶凝强度、稠化实验及水泥浆相容性实验。

1.2.1 泥饼清洗效率实验方法

将滤纸放入清水中 5 s 至滤纸湿透称重 m_1 ,取现场钻井液,按照国家标准 GB/T 16783.1-2012“钻井液现场测试第 1 部分:水基钻井液”在 50 ℃、3.5 MPa 条件下进行 30 min 滤失实验。然后取出钻井液所形成的滤饼,将泥饼在水中浸泡 5 s 至滤纸湿透称重 m_2 。小心地将滤饼固定在旋转黏度计外筒上。样品杯内装入酸性冲洗液,上移样品杯至泥饼膜全

部浸泡在溶液内,采用旋转黏度计在转速 200 r/min(相当于液体在环空的返速为 0.43 m/s)温度 50 ℃条件下冲洗 10 min,对冲洗后泥饼称重 m_3 。泥饼清洗效率 η 计算公式为:

$$\eta = (m_2 - m_3)/(m_2 - m_1) \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 胶结强度测定

将长 50.8 mm,直径 25.4 mm 的岩心浸泡在钻井液中,放置于高温高压养护釜,在 65 ℃、21 MPa 条件下养护 8 h,再放置于六速旋转黏度计浆杯内固定,取下六速旋转黏度计内筒,在浆杯内注入前置液,上移浆杯使岩心与黏度计外筒同心,以 300 r/min 转速冲洗。将冲洗后岩心放入胶结强度养护模具,四周倒入水泥浆,在 65 ℃、21 MPa 条件下养护 24 h;在压力试验机上通过顶替模具顶替岩心测定岩心和水泥环胶结强度。测试结果为三组平行试样的平均值。胶结强度计算公式为:

$$P = \frac{F}{\pi DH} \quad (2)$$

式中: P 为胶结强度,MPa; D 为岩心的直径,mm; H 为岩心的高度,mm; F 为剪切力,其大小等于试件压力载荷,N。

1.3 前置液及水泥浆配方

冲洗液配方:清水+4% CXY+4% KCl,密度 1.04 g/cm³。

酸性冲洗液配方:清水+4% SMSS-44L+(5%~10%)盐酸+4% KCl,密度 1.05 g/cm³。

隔离液配方:清水+2.5% G404SP+石灰石粉,密度 1.30 g/cm³。

先导水泥浆配方:G 级水泥+4% BXF-200L+0.3% BXR-200L+0.15% G432+0.1% G603,密度 1.65 g/cm³。

水泥浆配方:G 级水泥+4% BXF-200L+0.1% BXR-200L+4% BTC-800L+2.5% EXC-13+2% CA-3+0.2% D50+0.1% G603,密度 1.91 g/cm³。

2 实验结果与讨论

2.1 冲洗液性能

冲洗液 CXY 包含表面活性剂、钻井液稀释材料和小分子有机材料,具有较强的渗透作用,使井壁虚泥饼易于冲洗剥落,同时能够清除井壁油膜改善界面润湿性能,改善钻井液流动性提高顶替效率^[8-9]。因储层含有泥页岩夹层,在冲洗液中加入 KCl 保持井壁的稳定,防止井壁坍塌,保证施工

安全。

2.2 酸性冲洗液性能

用配置好的酸性前置液做泥饼冲洗效率实验。图1为泥饼冲洗前后对比效果,可看出冲洗后钻井液泥饼结构松散,泥饼更易于被清除。泥饼冲洗前为4.66 g,减去滤纸湿重1.81 g,泥饼净重为2.85 g。在酸性冲洗液中,以200 r/min的转速冲洗10 min后称重为2.49 g,冲洗前后泥饼重量差为2.17 g,泥饼清除率为76%。

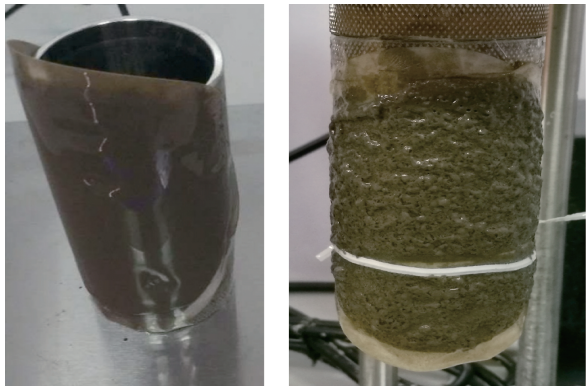


图1 泥饼冲洗前后对比

为了减少钻井液中固相对储层伤害,TAMBOCOCHA区块完井钻井液加重材料为石灰石粉,其主要成分为碳酸钙。因此井壁泥饼中骨架材料主要为碳酸钙颗粒,酸性冲洗液中盐酸可与碳酸钙反应使泥饼松散,提高泥饼冲洗效率,同时生成游离钙离子和氯离子可促进水泥浆水化反应^[10],从而进一步提高二界面胶结质量。

2.3 隔离液性能

隔离剂G404SP为耐温型聚合物,温度升高后黏度变化幅度较小,能够提高升温条件下隔离液稳定性。用300目石灰石粉作为加重剂配置隔离液,隔离液基本性能见表1。在温度50℃条件对隔离液、酸性冲洗液和领浆进行相容性实验,实验结果见表2。

表1 隔离液基本性能

| 密度/ (g·cm ⁻³) | 稳定性/ (g·cm ⁻³) | 表观黏度/ (mPa·s) | 塑性黏度/ (mPa·s) | 动切力/ Pa | 失水/ mL |
|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------|-----------|
| 1.40 | 0.01 | 100 | 63 | 37.5 | 62 |

表2 隔离液及其相容性实验性能

| 序号 | 酸性冲洗液/ 隔离液/水泥浆/% | 密度/ (g·cm ⁻³) | 稳定性/ (g·cm ⁻³) | 稠化时间/ min | Φ600 | Φ300 | Φ200 | Φ100 | Φ6 | Φ3 |
|----|---------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------|------|------|------|------|----|----|
| 1 | 100/0/0 | 1.05 | | | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0/100/0 | 1.4 | 0.02 | | 118 | 91 | 75 | 52 | 8 | 5 |
| 3 | 0/0/100 | 1.98 | 0 | 306 | 243 | 161 | 115 | 65 | 9 | 6 |
| 4 | 5/0/95 | 1.94 | 0.01 | 387 | 214 | 143 | 92 | 61 | 8 | 5 |
| 5 | 25/0/75 | 1.76 | 0.04 | >500 | 147 | 91 | 61 | 45 | 5 | 5 |
| 6 | 50/0/50 | 1.53 | 0.1 | | 114 | 79 | 53 | 32 | 5 | 3 |
| 7 | 0/5/95 | 1.95 | | 315 | 254 | 167 | 120 | 70 | 10 | 6 |
| 8 | 0/25/75 | 1.83 | | | 232 | 157 | 110 | 65 | 9 | 5 |
| 9 | 0/50/50 | 1.70 | | | 225 | 143 | 108 | 64 | 8 | 5 |
| 10 | 0/75/25 | 1.54 | | | 174 | 130 | 101 | 60 | 9 | 6 |
| 11 | 0/95/5 | 1.43 | | | 126 | 95 | 77 | 55 | 9 | 5 |
| 12 | 5/25/70 | 1.79 | 0.01 | 366 | 201 | 142 | 103 | 61 | 8 | 4 |
| 13 | 10/30/60 | 1.72 | 0.01 | 452 | 178 | 127 | 89 | 55 | 7 | 4 |

水泥浆中掺入酸性冲洗液后稠化时间增加,稳定性变差,酸性冲洗液对水泥浆有缓凝作用,因此需用隔离液将其与水泥浆进行有效隔离,避免水泥浆被污染影响固井质量。隔离液与酸性冲洗液和水泥浆有良好的相容性,对水泥浆流动性影响较小,能够保证固井施工安全。

2.4 先导水泥浆性能

先导水泥浆基本性能见表3,先导水泥浆具有良好的稳定性和流动性,可在低环空返速下达到紊流状态提高顶替效率^[11]。先导水泥浆能够进一步隔离酸性冲洗液和水泥浆,增加界面水泥亲和性,提高界面胶结质量。先导水泥浆不用于封固,悬挂

器坐挂后循环出井筒。在 50 ℃条件下对先导浆和前置液做水泥浆污染实验,实验结果见表4。由表4可知前置液对先导水泥浆流变性能影响不大,稠化时间略有增加,可满足该地区施工需求。

表3 先导水泥浆性能

| 密度/ (g·cm ⁻³) | 密度差/ (g·cm ⁻³) | 初始稠度/ Bc | 稠化时间/ h | 失水/ mL | 流性 指数 | 稠度 系数 |
|------------------------------|-------------------------------|-------------|------------|-----------|----------|----------|
| 1.62 | 0.2 | 10 | 8 | 80 | 0.82 | 0.13 |

表4 先导水泥浆混浆污染性实验

| 混浆比例 | 密度/(g·cm ⁻³) | 稠化时间/min | Φ600 | Φ300 | Φ200 | Φ100 | Φ6 | Φ3 |
|-------|--------------------------|----------|------|------|------|------|----|----|
| 1:1:1 | 1.37 | | 74 | 55 | 43 | 36 | 12 | 8 |
| 1:2:1 | 1.38 | | 89 | 67 | 56 | 23 | 11 | 6 |
| 1:4:5 | 1.48 | >600 | 99 | 75 | 61 | 52 | 15 | 10 |

注:混浆为酸性冲洗:隔离液:先导浆。

2.5 复合前置液体系泥饼冲洗效率评价

取现场密度为 1.1 g/cm³ 的完井钻井液,在 50 ℃、3.5 MPa 条件下进行 30 min 滤失实验。滤饼

固定在旋转黏度计外筒上,并在泥饼上附着一层原油。在转速 200 r/min 温度 50 ℃条件下按不同冲洗方案模拟冲洗,不同冲洗方案泥饼清洗效率见表5。

表5 冲洗方案及清洗效率

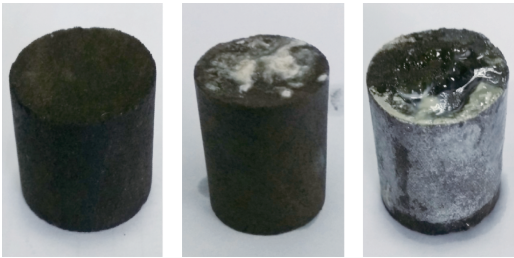
| 序号 | 各种液体清洗时间/min | | | | | | | | | 冲洗效率 /% |
|----|--------------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|------------|
| | 冲洗液 | 酸性冲洗液 | 隔离液 | 冲洗液 | 酸性冲洗液 | 隔离液 | 冲洗液 | 酸性冲洗液 | 隔离液 | |
| 1 | 10 | 10 | 10 | | | | | | | 86 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 85 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 95 |
| 4 | 10 | 0 | 10 | | | | | | | 45 |
| 5 | 4 | 0 | 4 | 3 | 0 | 3 | 3 | 0 | 3 | 52 |
| 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 96 |

通过表5可看出酸性冲洗液可显著提高泥饼清洗效率,3种前置液循环交替注入情况较正常顺序注入情况下泥饼清除效率更高。方案3和方案6冲洗效率相近,3种前置液总冲洗时间 10 min 时泥饼清洗效果较好,接触时间进一步增加清洗效果改善不明显。固井施工时交替注入3种前置液,3种前置液协同作用逐层清除井壁泥饼,冲洗液稀释钻井液提高顶替效率,清除井壁油膜。酸性冲洗液溶蚀泥饼中碳酸钙颗粒使泥饼松散,隔离液中碳酸钙颗粒可对疏松泥饼进行有效冲刷,高分子聚合物对井壁泥饼的吸附作用和拖拽作用提高虚泥饼中高分子聚合物冲洗效率^[12-13],同时隔离液可承载泥饼中剥离的碳酸钙和黏土颗粒,保障固井施工安全。

2.6 界面胶结强度测试

分别用清水、冲洗液、复合酸性前置液对养护后的岩心进行冲洗,对比冲洗前后(见图2),可以看出,较普通冲洗液体系,复合酸性前置液体系能够更有效清除岩心表面钻井液和泥饼。然后用冲洗

后岩心以及未经钻井液养护的空白岩心进行界面胶结强度测试,实验结果见表6。



a. 冲洗前 b. 普通冲洗液冲洗 c. 复合酸性前置液冲洗

图3 冲洗前后岩心对比

表6 界面胶结强度测试结果

| 序号 | 冲洗方式 | 胶结强度/ MPa |
|----|---|--------------|
| 1 | 空白岩心对比样 | 1.97 |
| 2 | 清水冲洗 7 min | 0.04 |
| 3 | 冲洗液冲洗 7 min | 0.32 |
| 4 | 冲洗液 7 min/酸性冲洗液 7 min/隔离液 7 min | 1.36 |
| 5 | 冲洗液 3 min/酸性冲洗液 3 min/隔离液 3 min/ 冲洗液 4 min/酸性冲洗液 4 min/隔离液 4 min | 1.61 |

测试结果表明清水和单一冲洗液无法将岩心表面泥饼冲洗干净,胶结强度非常低,单一冲洗液体系冲洗后胶结强度只有空白岩心胶结强度的16%。复合酸性前置液体系冲洗后岩心和水泥石胶结强度明显增大,交替注入的冲洗方式界面胶结强度更高,达到单一冲洗液体系的5倍。

3 现场应用

3.1 固井技术措施

提高固井质量措施主要有以下几个方面:①采用旋转尾管固井提高钻井液顶替效率和泥饼清洗效率^[14];②应用冲洗液+酸性冲洗液+隔离液的复合前置液体系提高顶替效率和二界面泥饼清洗效果,为提高水泥界面胶结强度和封固质量创造条件;③提高套管居中度,避免套管在井眼内偏心造成环空液体流速差过大或窄边钻井液滞留,消除钻井液滞留带^[15-16];④应用水泥浆先导浆减少前置液和钻井液对水泥浆的污染,产层固井应用微膨胀防水窜水泥浆体系降低油水窜对固井质量的影响,提高产层环空密封完整性。

表7 TMBA XX井177.8mm尾管固井施工工艺流程

| 序号 | 操作内容 | 用量/ m ³ | 密度/ (g·cm ⁻³) | 排量/ (m ³ ·min ⁻¹) |
|----|---------|-----------------------|------------------------------|---|
| 1 | 冲洗管线试压 | | 1 | 0.5 |
| 2 | 泵送冲洗液 | 3 | 1.04 | 0.7 |
| 3 | 泵送隔离液 | 3 | 1.4 | 0.9 |
| 4 | 泵送冲洗液 | 1 | 1.04 | 0.7 |
| 5 | 泵送酸性冲洗液 | 3 | 1.05 | 0.7 |
| 6 | 泵送冲洗液 | 1 | 1.04 | 0.7 |
| 7 | 泵送隔离液 | 2 | 1.4 | 0.9 |
| 8 | 泵送冲洗液 | 1 | 1.04 | 0.7 |
| 9 | 泵送酸性冲洗液 | 6 | 1.05 | 0.7 |
| 10 | 泵送冲洗液 | 1 | 1.04 | 0.7 |
| 11 | 泵送隔离液 | 4 | 1.4 | 0.9 |
| 12 | 泵送先导水泥浆 | 4 | 1.62 | 0.9 |
| 13 | 注领浆 | 2.5 | 2.04 | 0.7 |
| 14 | 注尾浆 | 5 | 2.04 | 0.7 |
| 15 | 释放钻杆胶塞 | | | |
| 16 | 替清水 | 1 | 1 | 0.9 |
| 17 | 替钻井液 | 20 | 1.1 | 0.8 |
| 18 | 替钻井液 | 1 | 1.1 | 0.3 |
| 19 | 碰压 | | | |
| 20 | 放回水 | | | |
| 21 | 悬挂器坐挂 | | | |
| 22 | 循环 | 100 | 1.1 | 1.6 |

3.2 应用实例

酸性复合前置液体系在厄瓜多尔 TAMBOC-OCHA 区块 177.8 mm 尾管固井中已应用 19 口井,除一口井由于水泥浆量设计偏少致使上部裸眼段封固质量差外,其他井裸眼段固井质量和界面胶结质量全部良好。固井施工过程中,为避免前置液注入时酸性冲洗液中盐酸与隔离液中石灰石粉反应影响酸性冲洗液冲洗效果,保障酸性冲洗液和钻井液及水泥浆的有效隔离,3种前置液注入顺序稍作调整(见表7)。

悬挂器坐挂后前置液及先导水泥浆全部循环出井筒,共返出水泥浆及混浆 7 m³,密度最高 1.70 g/cm³,测定混浆为碱性,表明隔离液及先导浆可有效隔离酸性冲洗液和水泥浆。固井施工结束后 18 h 测固井质量,裸眼段固井质量优,界面胶结质量良好。

4 结论

(1)酸性冲洗液中盐酸可与泥饼中碳酸钙反应使泥饼松散,利于提高泥饼清洗效率。

(2)多种前置液交替注入协同作用可有效提高顶替效率和泥饼冲洗效率,为提高固井质量和界面胶结质量提供基础。

(3)先导水泥浆和隔离液可有效隔离酸性冲洗液和水泥浆,避免酸性冲洗液污染水泥浆,防止影响水泥稠化时间和固井质量。

参考文献:

[1] 潘宇强,唐凯.TAMBOCOCHA 43 区块尾管固井难点及对策[J].钻井液与完井液,2019,36(4):495-499.

[2] 任春宇,陈大钧.RC 型冲洗液性能的室内研究[J].钻井液与完井液,2012,29(6):66-67,70.

[3] 李友臣,吴旭辉,张轩.固井前置液技术研究[J].西部探矿工程,2005,17(Z1):128-129.

[4] 杨宝林,顾军,郑涛,等.泥饼厚度对固井二界面胶结强度的影响[J].钻井液与完井液,2009,26(1):42-43,46.

[5] 杨香艳,韩喜龙,陈浩,等.前置液体系在龙17井固井中的应用[J].天然气工业,2008,28(7):55-57.

[6] 杨振杰,李家芬,苏长明,等.新型胶乳冲洗隔离液实验[J].天然气工业,2007,27(9):51-53.

[7] 刘钰龙,刘小利,唐凯.厄瓜多尔 Parahuacu 油田低压高渗小间隙尾管固井技术[J].复杂油气藏,2021,14(2):94-99.

[8] 王成文,孟仁洲,孟凡昌,等.一种高效固井冲洗液体

- 系:CN201410796455.9[P].2014-12-18.
- [9] 杨振杰,马成云,朱海涛,等.自修复固井前置液实验研究[J].钻井液与完井液,2013,30(2):55-58.
- [10] 崔茂荣,马勇.评价钻井液滤饼对固井二界面胶结质量影响的新方法[J].天然气工业,2006,26(12):92-93,96.
- [11] 杨香艳,郭小阳,杨远光,等.固井前置冲洗液的研究发展[J].西南石油学院学报,2005,27(1):70-74.
- [12] 李早元,杨绪华,郭小阳,等.固井前钻井液地面调整及前置液紊流低返速顶替固井技术[J].天然气工业,2005,25(1):93-95.
- [13] 陈二丁,王成文,孟仁洲.一种高效清除井壁滤饼的新型固井冲洗液[J].天然气工业,2015,35(8):69-74.
- [14] 王金堂,孙宝江,李昊,等.大位移井旋转套管固井顶替模拟分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):89-97.
- [15] 张铎远.浆体性能及井眼条件对顶替效率的影响研究[D].青岛:中国石油大学,2007.
- [16] 刘振通,宋志强,王军,等.硅酸钠前置液在委内瑞拉重油带固井中的应用[J].钻井液与完井液,2015,32(6):96-99.
- (编辑 韩 枫)

(上接第110页)

液油并建议采用二氧化碳+降黏吞吐方式。

(3)开展了冷热采交替工艺参数优化,包括热采阶段注入参数优化和冷采阶段吞吐方式与注入参数优化,并经21口井的现场应用,平均单井日产油4.9 t,周期产油量677.8 t,平均含水87.8%,生产态势良好。

参考文献:

- [1] 陈兆芳.乐安油田南区蒸汽吞吐后期开采方式研究[J].江汉石油学院学报,2003,25(2):85-86.
- [2] 张弦,范英才,刘建英,等.辽河中深层稠油油藏蒸汽驱后开发方式优化研究[J].复杂油气藏,2011,4(1):50-54.
- [3] 赵庆辉,张鸿,杨兴超,等.深层超稠油油藏蒸汽吞吐后转汽驱实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(3):146-154.
- [4] LIU J F, WU X M, SUN S G, et al. The application of complex displacement in cyclic steam stimulation CSS & steam flooding SF development in Liaohe oilfield: a field performance study [C]//SPE Canadian Energy Technology Conference. Calgary: SPE, 2022: SPE-208940-MS.
- [5] 钟立国,王成,刘建斌,等.中深层稠油油藏蒸汽-氮气复合吞吐技术[J].新疆石油地质,2019,40(2):194-198.
- [6] 周伟,寇根,张自新,等.克拉玛依油田九6区稠油油藏蒸汽-CO₂复合驱实验评价[J].新疆石油地质,2019,40(2):204-207.
- [7] BOBB J, HOSEIN R. An investigation into the combination of cyclic steam stimulation and cyclic CO₂ stimulation for heavy oil recovery in Trinidad and Tobago [C]//SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference. Port of Spain: SPE, 2018: SPE-191161-MS.
- [8] 刘毅.河口稠油化学吞吐体系研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- [9] 张弦,刘永建,车洪昌,等.辽河中深层稠油蒸汽驱油藏工程优化研究[J].复杂油气藏,2010,03(2):57-60.
- [10] 吴晓东,张玉丰,刘彦辉.蒸汽吞吐井注汽工艺参数正交优化设计[J].石油钻探技术,2007,35(3):1-4.
- [11] 张贤松,谢晓庆,何春百.海上稠油油田蒸汽吞吐注采参数优化研究[J].特种油气藏,2015,22(2):89-92.
- (编辑 韩 枫)