

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021029

引用格式: 孙林, 李旭光, 黄利平, 等. 渤海油田注水井延效酸化技术研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 90-95.

SUN Lin, LI Xuguang, HUANG Liping, et al. Research and application of prolonged-effect acidizing technology for water injection wells in the Bohai Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2): 90-95.

渤海油田注水井延效酸化技术研究与应用

孙 林, 李旭光, 黄利平, 夏 光, 杨 淼

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘 要: 针对渤海油田注水井重复酸化效果逐渐变差的问题, 进行了注水井延效酸化技术研究。采用 3 种低浓度深部缓速酸进行协同增效, 加强酸液的储层保护性能, 并加入防膨剂和表面活性剂, 配制了延效酸; 在温度 60 ℃ 条件下, 测试了延效酸对现场垢样、钙蒙脱石和二氧化硅的溶蚀效果, 抑制注入水结垢性能、洗油性能、缓速和总溶蚀性能, 以及动态驱替延效性能。试验得出: 延效酸对钙蒙脱石和现场垢样的溶蚀率分别可达 45.23% 和 86.08%, 对二氧化硅的溶蚀率仅 0.22%; 抑制结垢能力强; 酸液表面张力 12.77 mN/m; 延效酸与岩粉分别反应 2、4 和 6 h 后溶蚀率可达 9.39%、13.64% 和 24.54%; 动态驱替酸化后注入 20 倍孔隙体积的水, 渗透率增大倍数仍然稳定在 1.8~1.9 倍。注水井延效酸化技术在渤海油田应用 14 井次, 应用效果显著。研究表明, 延效酸具有综合解堵效果好、保护骨架、缓速性好、总溶蚀率高和延效性好等优点, 具有推广应用价值。

关键词: 重复酸化; 延效酸化; 有效期; 注水井; 渤海油田

中图分类号: TE357.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)02-0090-06

Research and Application of Prolonged-Effect Acidizing Technology for Water Injection Wells in the Bohai Oilfield

SUN Lin, LI Xuguang, HUANG Liping, XIA Guang, YANG Miao

(CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300452, China)

Abstract: In response to the deteriorating reacidizing of water injection wells in the Bohai Oilfield, a study on the prolonged-effect acidizing technology for water injection wells was carried out. The prolonged-effect acid was prepared by adding an anti-swelling agent and surfactant to three kinds of deep retarded acid in low concentrations that enhanced the reservoir protection capability of acid. At 60 ℃, the as-prepared acid was tested with respect to its dissolution on field scale samples, calcium montmorillonite, and silica, its scaling inhibition of injected water, oil-washing performance, retardation, total dissolution performance, and prolonged effect with dynamic displacement. The results showed that the dissolution rate of the prolonged-effect acid on the calcium montmorillonite and scale samples could reach 45.23% and 86.08% respectively, while that on silica was only 0.22%. The acid had strong inhibition of scaling and a surface tension of 12.77 mN/m. Its dissolution rate on rock powder could reach 9.39%, 13.64%, and 24.54% after 2, 4, and 6 h, respectively. And after dynamic displacement, the increase in the permeability after the injection of water 20 times the pore volume remained at 1.8–1.9 times. The proposed technology was applied to 14 wells in the Bohai Oilfield, achieving good results. The results showed that the prolonged-effect acid, with a high total dissolution rate, performed well in unblocking the water injection wells, protecting the framework, retarding the reaction of acid and rock and prolonging effect, which makes it worthy of wide application.

Key words: reacidizing; prolonged effect; valid period; water injection well; Bohai Oilfield

渤海油田现有开发井 3 000 余口, 其中注水井超过 800 口, “注好水、注够水、有效注水” 是注水稳产

的关键。为解决欠注、注水压力高等注入难题, 渤海油田将酸化技术作为增注的主要手段。据统计, 渤

收稿日期: 2020-08-19; 改回日期: 2021-02-01。

作者简介: 孙林 (1983—), 男, 四川南充人, 2006 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 高级工程师, 主要从事海上油气田酸化压裂方面的研究工作。E-mail: sunlin3@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海油田高效采油工程及配套技术示范”(编号: 2016ZX05058-003)、中海油能源发展股份有限公司项目“海上油田脉冲水力冲击压裂酸化联作技术研究与应用”(编号: HFKJ-GJ201904) 联合资助。

海油田近5年酸化作业多达500井次/年,占注水井措施工作量的三分之一,并且随着油田产量增加,酸化作业量还在逐渐增大,但在此过程中出现了注水井重复酸化现象,目前单井重复酸化次数普遍在7~11次,随着单井重复酸化次数增多,酸化效果逐渐变差,有效期仅为1~4个月,单井一年需要酸化2~3次,极大地影响了注水井的注入效果^[1-2]。

但是,目前国内有关重复酸化问题的研究不多,程兴生等人^[3-4]分析了桩104区块的重复酸化增注和轮南油田超深井重复酸化情况,认为常规土酸可能会过度溶蚀近井壁地带,建议采用有机缓速酸体系或低浓度氢氟酸;刘淑萍等人^[5]通过研究文留低渗透砂岩储层重复酸化,发现土酸或含(潜在)氢氟酸的酸液易对储层造成伤害,因此使用了膦酸、脂肪酸酯和含氟盐组成的有机缓速酸;吕宝强等人^[6]将我国重复酸化液体系归纳为土酸及其衍生物、氟硼酸及其衍生物、氟盐自生酸、固体硝酸等几类,建议根据各种酸液的优点,结合油藏的特征及具体酸化目的层的矿物组成,组合优选适宜的酸液体系、各种添加剂和施工工艺。由此可知,常规的高浓度土酸或土酸类酸液对重复酸化井储层的伤害较严重,需要根据储层特点和伤害原因,选用合适的酸化技术。

为了解决渤海油田注水井酸化中存在的问题,笔者分析了重复酸化低效的原因,配制了延效酸,研究形成了注水井延效酸化技术,室内评价试验验证该技术具有解堵效果强、缓速延效等优点,并在渤海油田进行了现场应用,结果表明该技术可有效减少单井重复酸化次数,提高单次酸化增注效果、延长酸化有效期,具有较大的推广应用价值。

1 重复酸化低效原因分析

渤海油田注水井重复酸化低效,除了与注入水水质、注采强度、酸化规模等常见因素有关以外^[7],还与酸液组分单一和储层伤害2因素密切相关。

渤海油田从2001年开始规模化采取酸化措施,曾采用过土酸、氟硼酸和多氢酸等酸液^[8-12],酸液体系组分比较单一。这些酸液通常对储层中特定矿物的溶解效果较好,但在重复采用单一酸液体系后,近井1~2 m范围内储层可溶物含量逐渐降低;而且,对于注入水中存在钙质、铁氧化物和有机质等污染物,酸液的解堵半径较小。

砂岩酸化会在一定程度上产生氟化物、氟硅酸盐、氢氧化铁、硫酸盐和磷酸盐等二次沉淀物^[13],随

着重复酸化次数增多,这些二次沉淀会在储层中逐渐聚集产生新的污染物,而这类二次沉淀通常较难解除。因此,目前对此只能以预防为主。

此外,重复酸化会导致渤海油田近井筒储层进一步疏松^[14-15]。渤海油田目前80%以上为疏松储层,渗透率高达1~10 D,泥质含量普遍在15%~30%,多采用射孔后再防砂的完井方式,采油强度和注水规模也较大,平均单井日注水量在400 m³以上,单井要酸化几次至十余次,更会影响储层骨架的稳定性,伴随着注水,会很快形成微粒运移伤害,导致注水效果变差。

2 注水井延效酸化技术

针对渤海油田注水井重复酸化低效的问题,提出了以下酸化技术思路:采用3种低浓度深部缓速酸进行协同增效,使酸液具有增加溶蚀矿物种类、更深部缓速和稳定储层骨架等性能;为加强酸液的储层保护性能,加入螯合剂提前预防二次沉淀;优选并加入防膨剂和表面活性剂,配制成延效酸。

2.1 低浓度深部缓速酸复配

研究发现,与土酸、氟硼酸、多氢酸等单一酸液不同,混合酸液短期(2 h)的岩屑溶蚀率并不高,但不同酸液混合可溶蚀岩石不同矿物组分^[16-18],使混合酸液产生协同增效效果。基于此,针对渤海油田的具体问题,采用改性硅酸、有机膦酸和氟硼酸等3种低浓度深部缓速酸进行复配,使酸液缓慢释放氢离子,复配后的酸液中改性硅酸质量分数为4%~6%,有机膦酸为3%~5%,氟硼酸为4%~6%。

其中,改性硅酸是在无机氟硅酸分子基础上嵌入羧基有机杂环,形成具有无机酸和有机酸双重功能的大分子,特别适合于泥质含量高的砂岩油藏,也适合于解决钻井液或聚合物堵塞。有机膦酸可溶解碳酸盐岩类和含铁类矿物。氟硼酸则通过水解电离缓慢释放氢氟酸,从而溶蚀长石、铝硅酸盐矿物。因此,复合缓速酸液长期(4~6 h)总溶蚀率较高,可以达到深部解堵的要求,解决了现有单一酸液存在的问题(短期溶蚀率较高,但酸岩反应1~2 h后特定反应矿物已达溶解极限,而残酸质量分数大于6%)。同时,复合缓速酸液具有缓慢释放氢离子、溶蚀多种矿物的特性,可大大减缓疏松砂岩储层酸化后酸液对微粒运移的影响。

2.2 螯合剂优选

3种低浓度深部缓速酸进行协同增效,会降低

二次沉淀的产生速度和质量;但根据渤海油田重复酸化中储层伤害的实际情况,还需要预防二次沉淀的产生。综合研究后,在复合酸液中加入1%~2% MA-AA 共聚物、3%~5% EDTMPS等螯合剂,以协同预防二次沉淀^[15,19],降低对储层的伤害。此外,加入 MA-AA 共聚物和 EDTMPS 等螯合剂,会产生单一段塞泵注、在线酸化等新功能。

2.3 防膨剂和表面活性剂优选

为了使复合缓速酸液在防止黏土膨胀的同时,还具有稳砂、固砂和洗油等功能,经综合研究优选,在复合缓速酸液中加入1.0%~2.0%聚季铵盐防膨剂和0.2%氟碳表面活性剂,最终形成了延效酸。

基于研制的延效酸,研究形成了具有高溶蚀、缓速、保护骨架、预防二次沉淀和洗油等功能的注水井延效酸化技术^[7,20]。

3 延效酸性能室内评价

3.1 综合解堵及保护骨架性能

测试延效酸对现场垢样、钠蒙脱石(模拟黏土)、二氧化硅(模拟石英骨架)的溶解能力,评价其综合解堵及保护骨架的性能。现场修井返排垢样(X射线分析结果表明,由质量分数43%的铁氧化物、35%的碳酸钙、16%的铝硅酸盐和6%的二氧化硅组成)、钠蒙脱石(分析纯)和二氧化硅(石英砂)分别与延效酸在60℃下反应6h,测试反应前后垢样、钠蒙脱石和二氧化硅的质量,计算溶蚀率,结果见表1。

表1 现场垢样、钙蒙脱石和二氧化硅静态溶蚀试验结果
Table 1 Static dissolution results for the field scale samples, calcium montmorillonite, and silica

试样	反应前质量/g	反应后质量/g	溶蚀率, %
现场垢样	10.439	1.453	86.08
	10.088	1.314	86.97
钙蒙脱石	5.003	2.740	45.23
二氧化硅	5.001	4.990	0.22

从表1可以看出,延效酸对钙蒙脱石的溶蚀率可达45.23%,对现场垢样的溶蚀率达86.08%以上,说明其具有较好的综合解堵性能;对二氧化硅的溶蚀率仅0.22%,说明其具有较好的保护骨架能力。

3.2 抑制注入水结垢性能

为评价延效酸抑制结垢的能力,使用过滤后的

注入水(由于注入水中固相含量较多,结合注入水和现场垢样组分分析报告,判断肉眼可见的油污和黄褐色杂质为铁氧化物、碳酸盐和油污等污染物。为了消除污染物产生的误差,使用过滤后的注入水进行试验),与延效酸(为便于观察,未加添加剂)分别按1:0、0:1、2:1、1:2的体积比混合后,加热至60℃恒温24h,观察溶液结垢情况。

试验结果表明,未加入延效酸的注入水样底部出现明显的白色沉淀,该沉淀可溶于盐酸,判断为碳酸盐垢;延效酸及其与注入水的混合样品均未观察到沉淀,可见延效酸抑制结垢的能力较强。

3.3 洗油性能

为确保延效酸具有良好的洗油性能,采用常温悬滴法,测试了延效酸原液和延效酸与注入水按1:2体积比混合后溶液的表面张力。

测试结果表明,延效酸的表面张力为12.77 mN/m,延效酸与注入水按1:2体积比混合后溶液的表面张力为20.19 mN/m。对比其他酸液,其表面张力都较低,说明延效酸具有良好的洗油性能。

3.4 缓速及总溶蚀性能

为了评价延效酸的缓速、总溶蚀性能,采用蓬莱油田岩屑(来自1115~1120m井段,经过研磨、洗油、洗盐和烘干处理),在60℃条件下,将其分别与延效酸、氟硼酸和另一种深部缓速酸反应2、4和6h,测试反应前后岩屑的质量,计算溶蚀率。延效酸、氟硼酸和深部缓速酸的缓速溶蚀静态评价试验结果如图1所示。

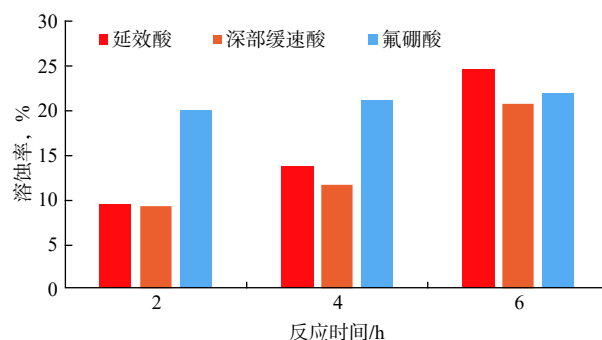


图1 几种酸液的缓速溶蚀静态评价试验结果

Fig.1 Static evaluation results for retarded dissolution of different acids

由图1可知,随着反应时间增长,延效酸的溶蚀率从9.39%提高至24.54%,变化幅度较大,而氟硼酸的溶蚀率仅从20.02%提高至21.91%,效果不明显,可见延效酸的缓速效果优于氟硼酸。此外,延效酸的6h溶蚀率为24.54%,也是3种酸液中最高的。试验表

明, 延效酸的缓速性能优良, 且总溶蚀性能较好。

3.5 动态延效性能

为了解延效酸的动态驱替增渗能力, 同时测量稳定注水后的渗透率保留率, 从而评价其动态延效性能, 采用酸化动态驱替试验装置和现场取心样品 (1#~4#岩心, 取自井深 1 133.38~1 348.32 m) 进行驱替试验。将试验装置加热至 60 ℃ 后, 先驱替 10 倍孔隙体积注入水, 然后驱替 5 倍孔隙体积酸液, 再驱替 20 倍孔隙体积注入水, 实时测量水驱渗透率和上游压力, 记录酸化前注入 10 倍孔隙体积注入水的渗透率、酸化后分别注入 10 倍孔隙体积和 20 倍孔隙体积注入水的渗透率, 分别计算酸化后与酸化前渗透率比值, 并通过渗透率比值及上游压力变化来对比酸化后降压解堵和稳压效果, 试验采用了延效酸和常规酸进行对比评价, 试验结果见图 2、图 3 和表 2。

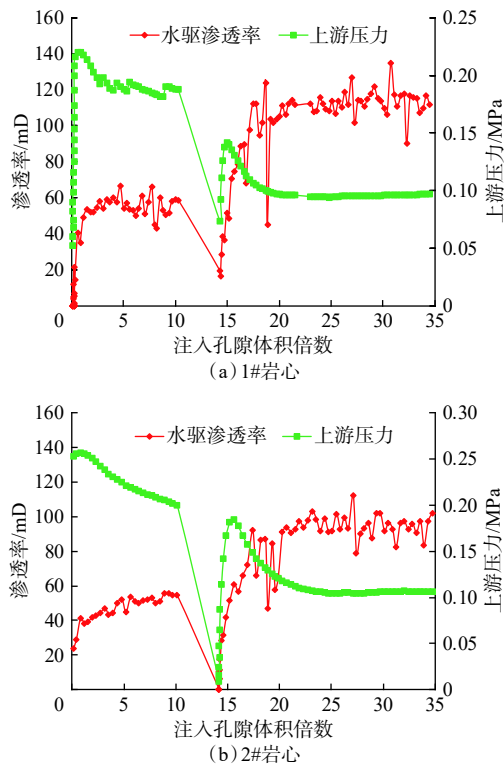


图 2 延效酸动态驱替试验结果

Fig.2 Dynamic displacement results for prolonged effect acid

由图 2、图 3 和表 2 可以看出: 延效酸酸化后的岩心渗透率为酸化前的 1.7~1.9 倍, 而且在注入 20 倍孔隙体积水的情况下, 其渗透率基本保持不变, 上游压力保持稳定; 常规酸酸化后的短期渗透率(注入 10 倍孔隙体积水)为酸化前的 1.1~1.3 倍, 但渗透率下降较明显, 上游压力持续升高; 常规酸

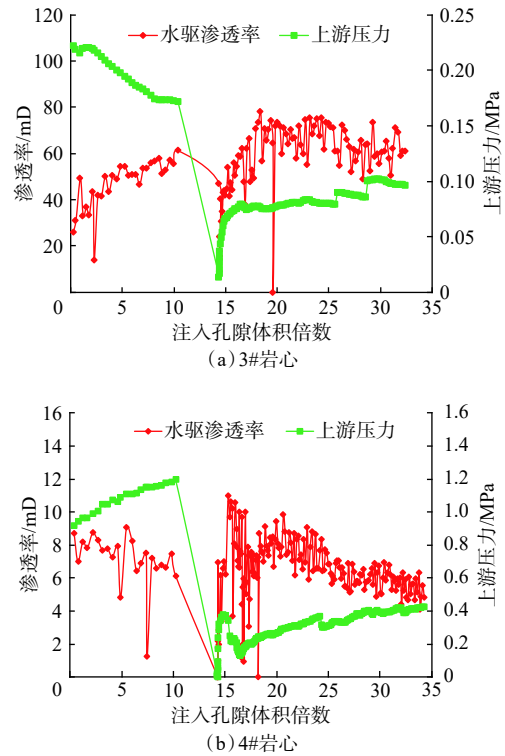


图 3 常规酸动态驱替试验结果

Fig. 3 Dynamic displacement results for conventional acid

表 2 酸液延效动态驱替评价试验结果

Table 2 Results for dynamic displacement evaluation of prolonged-effect acid

岩心	酸液	酸化前 渗透率/mD	酸化后与酸化前渗透率比值	
			注入10倍孔隙 体积水	注入20倍孔隙 体积水
1#	延效酸	58	1.9	1.9
2#	延效酸	54	1.7	1.8
3#	常规酸	55	1.3	1.1
4#	常规酸	7	1.1	0.7

酸化后注入 20 倍孔隙体积水的渗透率为酸化前的 0.7~1.1 倍, 说明常规酸酸化会导致近井筒储层进一步疏松, 酸化后注水短期效果较好, 但会影响后续注水效果, 而延效酸可以解决该问题。

4 现场应用

截至目前, 注水井延效酸化技术在渤海油田应用 14 井次, 应用效果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 相比于常规酸酸化, 平均单井增注量从 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 增至 $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 视吸水指数从增大 2.1 倍变为增大 3.2 倍, 有效期从 134 d 延长至 288 d, 延效效果显著。

表3 渤海油田注水井延效酸化技术应用数据

Table 3 Application of prolonged-effect acidizing technology to water injection wells in the Bohai Oilfield

井号	注入压力/MPa		注入量/(m ³ ·d ⁻¹)		视吸水指数增大倍数	增注量/m ³	有效期/d
	酸化前	酸化后	酸化前	酸化后			
S-D15	10.0	9.1	141	515	4.0	36 655	150
B-A7	11.0	8.5	501	805	2.1	39 149	142
B-A20	11.7	5.5	254	521	4.4	138 038	567
B-C13	9.3	6.0	509	530	1.6	59 003	322
K-A14	8.9	2.5	370	541	5.2	88 859	581
S-C41	9.9	0.9	334	594	19.6	201 289	673
B-A4	9.0	5.0	43	509	21.3	96 404	228
P-D50	6.0	5.9	350	576	1.7	5 475	40
Q-P1	11.0	3.0	254	377	5.4	125 659	346
B-A4-2	9.0	3.0	306	520	5.1	35 099	273
K-A19	11.0	5.5	251	254	2.0	15 487	258
K-A20	12.6	6.0	504	557	2.3	11 592	118
K-A9	12.0	4.2	466	477	2.9	10 842	211
K-A8	10.0	4.0	720	603	2.1	2 480	164
平均					3.2	61 859	288

B-C13 井注水层位 2 626.30~2 651.00 m, 渗透率 25.2~289.9 mD。该井首先进行了 2 次常规酸酸化作业, 然后应用延效酸进行了一次酸化作业。第 1 次酸化采用多氢酸, 短期效果十分明显, 但酸化后有效期只有 63 d; 第 2 次酸化采用氟硼酸, 酸化后有

效期也只有 62 d; 第 3 次酸化采用延效酸, 酸化后注水量虽比酸化前略有下降, 但满足配注量 500 m³/d 的指标, 且注水压力从 9.3 MPa 降至 6.0 MPa, 视吸水指数提高了 53 %, 有效期达到 322 d (见表 4)。这说明, 延效酸酸化可以延长重复酸化的有效期。

表4 B-C13 井 3 次酸化效果对比

Table 4 Comparison among three applications of acidizing in Well B-C13

酸化次序	酸液	酸液用量/m ³	注入压力/MPa		注入量/(m ³ ·d ⁻¹)		有效期/d
			酸化前	酸化后	酸化前	酸化后	
1	多氢酸	65	9.8	0	164	528	63
2	氟硼酸	60	11.4	9.8	268	450	62
3	延效酸	28	9.3	6.0	509	503	322

5 结论与建议

1) 针对渤海油田注水井重复酸化有效期短的问题, 在分析原因的基础上, 通过配制延效酸, 研究形成了注水井延效酸化技术。

2) 延效酸室内性能评价试验和现场应用效果分

析表明, 注水井延效酸化技术具有解堵效果好、缓速延效等优点, 可提高单次酸化的增注效果、延长有效期, 适用于存在多种复合伤害、需要进一步提高重复酸化解堵效果的疏松砂岩类井况。

3) 渤海油田非均质性较强, 而延效酸不具备转向布酸功能, 需要进一步研究分流转向问题; 此外, 应进一步优化试剂成本, 延长酸液在线酸化的时间

和酸化规模, 进一步增大酸化处理解堵半径。

参 考 文 献

References

- [1] 王国壮, 梁承春, 孙招锋, 等. 红河油田长6特低渗油藏多元复合酸降压增注技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 96–101.
WANG Guozhuang, LIANG Chengchun, SUN Zhaofeng, et al. Decompression and augmented injection technology with polybasic recombination acid for Chang-6 ultra-low permeability reservoir in Honghe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 96–101.
- [2] 李进, 王昆剑, 韩耀图, 等. 渤海油田注水井酸化效果预测评价方法[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(4): 506–511.
LI Jin, WANG Kunjian, HAN Yaotu, et al. Methods of predicting and evaluating effect of acidizing job of water injectors in Bohai Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(4): 506–511.
- [3] 程兴生, 舒玉华, 陈伟, 等. 桩104区块重复酸化增注工作液优选[J]. 钻井液与完井液, 1998, 15(3): 17–20.
CHENG Xingsheng, SHU Yuhua, CHEN Wei, et al. Optimization of an acidizing fluid in Zhuang 104 Block[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1998, 15(3): 17–20.
- [4] 舒玉华, 张汝生, 蒋卫东. 轮南油田超深井重复酸化增注工作液[J]. 钻井液与完井液, 1999, 16(1): 12–14.
SHU Yuhua, ZHANG Rusheng, JIANG Weidong. The working fluid of reacidizing and stimulation of injection for super-deep well in Lunnan Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1999, 16(1): 12–14.
- [5] 刘淑萍, 高瑞民, 刘亚勇, 等. 文留油田低渗透砂岩储层重复酸化用酸液及其应用[J]. 油田化学, 2004, 21(2): 107–109, 102.
LIU Shuping, GAO Ruimin, LIU Yayong, et al. Acidizing fluid for repeated acidization stimulation of low permeable reservoirs in Wenliu Oil Fields and its application[J]. Oilfield Chemistry, 2004, 21(2): 107–109, 102.
- [6] 吕宝强, 李向平, 李建辉, 等. 我国重复酸化酸液体系的应用[J]. 油田化学, 2014, 31(1): 136–140.
LYU Baoqiang, LI Xiangping, LI Jianhui, et al. Application situation of reacidizing system in China[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(1): 136–140.
- [7] 孙林, 孟向丽, 蒋林宏, 等. 渤海油田注水井酸化低效对策研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 144–147.
SUN Lin, MENG Xiangli, JIANG Linhong, et al. Countermeasures of inefficient acidification in water injection wells of Bohai Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 144–147.
- [8] 易飞, 赵秀娟, 刘文辉, 等. 渤海油田注水井解堵增注技术[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(5): 53–56.
YI Fei, ZHAO Xiujuan, LIU Wenhui, et al. Plugging removal and injection enhancement technology for the water injection wells in Bohai Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(5): 53–56.
- [9] 景步宏. 有机多元酸(SY)缓速及防沉淀性能研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 103–106.
JING Buhong. Retardation and deposition control mechanism of organic multivariate acid (SY)[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 103–106.
- [10] 刘义刚, 陈征, 孟祥海, 等. 渤海油田分层注水井电缆永置智能测调关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 133–139.
LIU Yigang, CHEN Zheng, MENG Xianghai, et al. Cable implanted intelligent injection technology for separate injection wells in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 133–139.
- [11] 孙林, 杨万有, 李旭光, 等. 海上油田爆燃压裂技术研究与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 91–96.
SUN Lin, YANG Wanyou, LI Xuguang, et al. Research and field test of deflagration fracturing technology in offshore oilfields[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 91–96.
- [12] 邓建明. 渤海油田低产低效井综合治理技术体系现状及展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 111–117.
DENG Jianming. Status and prospect comprehensive treatment technologies for low production and low efficiency wells in Bohai Oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3): 111–117.
- [13] 赵立强, 陈祥, 山金城, 等. 注水井螯合酸复合解堵体系研究与应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 123–131.
ZHAO Liqiang, CHEN Xiang, SHAN Jincheng, et al. Research and application of chelating acid blocking removal system for injection wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(3): 123–131.
- [14] 张丽平, 张璐, 兰夕堂, 等. 非酸解堵技术在渤海油田的应用[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(2): 116–121.
ZHANG Liping, ZHANG Lu, LAN Xitang, et al. Application of non-acid block removing technology in Bohai Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(2): 116–121.
- [15] 刘玉国, 贾培锋, 陈刚, 等. 疏松砂岩油藏水平井均衡酸洗工艺[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 805–809.
LIU Yuguo, JIA Peifeng, CHEN Gang, et al. Uniform acidizing technology for horizontal wells in unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6): 805–809.
- [16] BENNETT P C. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(7): 1781–1797.
- [17] BLAKE R E, WLAKEALTER L M. Kinetics of feldspar and quartz dissolution at 70–80 °C and near-neutral pH: effects of organic acids and NaCl[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(13/14): 2043–2059.
- [18] 陈传平, 固旭, 周苏闽, 等. 不同有机酸对矿物溶解的动力学实验研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 1007–1012.
CHEN Chuanping, GU Xu, ZHOU Sumin, et al. Experimental research on dissolution dynamics of main minerals in several aqueous organic acid solutions[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(7): 1007–1012.
- [19] 杨乾隆, 李立标, 陶思羽, 等. 注水井不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5): 90–94.
YANG Qianlong, LI Libiao, TAO Siyu, et al. Chelate acid pulse injection and acidizing stimulation technology for immobilized injecting well string[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5): 90–94.
- [20] 孙林, 杨军伟, 周伟强, 等. 一种适合海上砂岩油田的单段塞活性酸体系[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 97–101.
SUN Lin, YANG Junwei, ZHOU Weiqiang, et al. Acidizing offshore sandstone reservoir with a single slug active acid system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 97–101.