

注水井不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术

杨乾隆¹, 李立标¹, 陶思羽¹, 陆小兵², 朱继云¹

(1. 中国石油长庆油田分公司第十采油厂, 甘肃庆阳 745100; 2. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710021)

摘 要:长庆油田低渗透砂岩油藏注水井受储层物性及注入水水质等因素的影响, 高压欠注井逐年增多, 而常规酸化增注技术工序复杂且有效期较短。为了提高酸化增注效果, 简化施工流程, 缩短措施占井周期, 通过酸液体系配比试验、岩心驱替试验和缓蚀性能试验, 研发了一种 COA-1S 酸液, 该酸液具有较好的缓速、腐蚀和螯合抑制性能; 通过工艺优化, 将水力脉冲技术与酸化增注技术结合, 提出了注水井不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术, 其具有施工不动管柱、不泄压、不返排等优点。该酸化增注技术现场应用了 3 井次, 有效率 100%, 酸化后平均注水压力下降 9.2 MPa, 单井增注水量 12.3 m³/d, 取得了较好的效果。现场应用表明, 该技术降压增注效果显著, 解决了常规酸化工序复杂、占井周期长等问题, 具有较好的推广应用前景。

关键词:砂岩油藏; 注水井; 不动管柱; 螯合酸; 酸化; 增注; 脉冲

中图分类号:TE357.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2018)05-0090-05

Chelate Acid Pulse Injection and Acidizing Stimulation Technology for Immobilized Injecting Well String

YANG Qianlong¹, LI Libiao¹, TAO Siyu¹, LU Xiaobing², ZHU Jiyun¹

(1. The No. 10 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu, 745100, China; 2. Oil & Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710021, China)

Abstract: The injection wells in the sandstone reservoirs in the Changqing Oilfield were affected by many factors including reservoir physical properties and water quality, resulting in increasing high-pressure and under-filled wells. Conventional acidizing and injection technology have a complicated process and their term of effective performance is very short. In order to improve the effect of acidizing and injection, to simplify the operation process, and to reduce the treatment time, we proposed a COA-1S acid fluid system for tests of the acid system ratio test, core flooding and corrosion inhibition performance. This system exhibits good retardation, anti-corrosion and chelation performance. The chelate acid pulse injection and acidizing stimulation technology were developed by means of a process of technique optimization, which integrates hydraulic pulse technology with the acidizing and injection technology. This technology has the advantages of immobilizing the string, does not require pressure relief, and there is no reverse discharge. This chelate acid pulse injection and acidizing stimulation technology for immobilized string of injecting well were been applied to three wells and times, with effective efficiency up to 100%. The average water injection pressure was decreased by 9.2 MPa after acidizing, and water injection volume for single well was increased by 12.3 m³/d, with quite good results. The field application demonstrated that the technology has an obvious effect in reducing pressure and increasing injection, which solved the problems of conventional acidizing technique in complex acidizing treatment process and a long well occupation time. It possesses good application and promotion prospects.

Key words: sandstone oil reservoir; water injection well; immobilized string; acid chelating; acidizing; injection increase; pulse

注水是油田增产稳产的有效手段之一, 我国 80% 以上原油产量来自注水开发油田^[1-3]。长庆油田低渗透、特低渗透砂岩油藏受储层物性及注入水水质等因素的影响, 部分区块注水压力逐年上升, 导致注水井出现高压欠注现象。酸化是降压增注的有

收稿日期:2018-01-29; **改回日期:**2018-06-06。

作者简介:杨乾隆(1988—), 男, 陕西宝鸡人, 2012 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 2015 年获西南石油大学石油与天然气工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事油气开采方面的研究工作。
E-mail: yangql_frac@126.com。

力手段之一,砂岩油藏主要采用土酸、氢氟酸和多氢酸等酸液进行酸化增注,但常规砂岩酸化增注技术存在作用距离有限、有效期较短、施工工序复杂、占井周期长和多次酸化增注无效等突出矛盾^[4-5]。2004 年,U. Chike 等人^[6]率先提出了“一步”代替“多步”的一体酸概念,此后,众多学者对此进行了大量的研究工作^[7-11]。刘涛等人^[12-13]将酸液酸化和水力脉冲结合,并通过试验分析了先脉冲后酸化、先酸化后脉冲和边脉冲边酸化等 3 种酸化模式的酸化效果,结果表明,复合酸化比单独酸化的效果好,而边脉冲边酸化的效果最好。

笔者借鉴前人研究成果和以往现场施工经验,在现有酸化工艺的基础上,对优化后的高效酸液进行了室内评价,通过优选和模拟研究分析脉冲式注入方式对酸化效果的影响,提出了注水井不动管柱脉冲式注入酸化增注技术,打破了常规酸化施工周期长、工序复杂和设备动用多的现场施工模式,具有施工不停注、不动管柱、不泄压和不返排等优点,现场应用增注效果较好。

1 脉冲式酸化增注技术原理及可行性

注水井不动管柱脉冲式注入酸化增注技术(简称不动管柱脉冲式酸化)的主要原理是:通过优化得到一种新型高效酸液,将常规砂岩“三段式”酸化模式简化为单步酸化,即高效酸液具有前置液、处理液和后置液的作用,从而形成酸化增注技术。该技术具有不动管柱、不泄压、不返排和占井周期短等优点,为了加强酸化效果,将水力脉冲与酸化技术结合,即注酸时通过控制排量交替变化,使酸液在井底产生水力冲击波,迫使液体中出现水击现象(即在短时间内液体流速剧增或骤降);由于酸液流速的突然变化,使注入压力突然升高或降低,从而在油管中产生交替升降的压力,冲击波经传播作用在油层岩石壁面,并进行交变扰动和振荡剪切,可使储层岩石产生微裂缝;同时水力冲击压力能使流体快速流动,起到冲刷孔道和携带堵塞物脱离孔道的作用,即形成一种“动态解堵”过程,从而达到深部解堵的目的。

为了验证该技术的可行性,选取目标区 Y1-01 井的 2 块岩心进行室内试验,依据目标区地层温度将试验温度设定为 60 ℃,首先用基液测得 2 块岩心的原始渗透率,然后进行不动管柱脉冲式酸化与常规不动管柱酸化,完成注酸后采用基液进行驱替,分别测得 2 块岩心酸化后的渗透率,结果如图 1、图 2 所示(图

中, K 、 K_0 分别为酸化后和酸化前的岩心渗透率)。

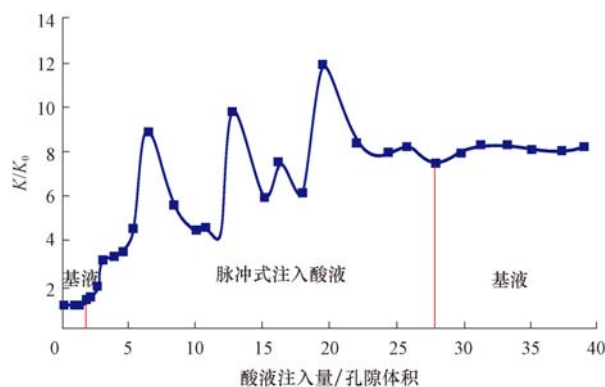


图 1 不动管柱脉冲式酸化后与酸化前岩心渗透率的比

Fig. 1 Permeability ratio before and after pulse injection and acidizing

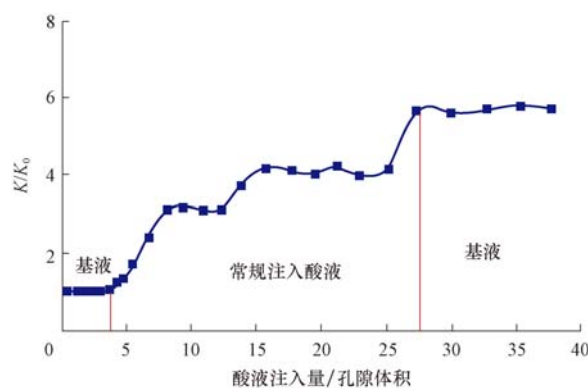


图 2 常规不动管柱酸化后与酸化前岩心渗透率的比

Fig. 2 Permeability ratio before and after conventional injection and acidizing

从图 1 和图 2 可以看出,采用不动管柱脉冲式酸化后,酸化后与酸化前岩心渗透率的比由 1.0 升至 8.2,渗透率提高了 7.2 倍;而采用常规不动管柱酸化后,酸化后与酸化前岩心渗透率的比由 1.0 升至 5.7,渗透率提高了 4.7 倍,可见不动管柱脉冲式酸化增注效果较好。

2 酸液性能评价

为了实现不动管柱酸化施工,必须优化酸液的性能,达到“以一代三”的效果。为此,结合长庆油田储层特征、欠注机理和注入水水质,进行了大量室内试验,研发了 COA-1S 酸液。该酸液由盐酸、氢氟铵盐、有机磷酸和螯合剂等多种添加剂配制而成,为多元弱酸,其水解速率缓慢,注入地层后可以达到深穿透目的,同时具有较强的螯合抑制性能,能减少二次沉淀的产生。

2.1 缓速性能

酸液反应速率决定了酸液的有效作用距离,为了评价 COA-1S 酸液的缓速性能,进行了室内对比试验。在 60 ℃下,分别用土酸和 COA-1S 酸液与目标区岩粉反应 4 h,测定不同反应时间下岩粉的溶蚀率,结果如图 3 所示。

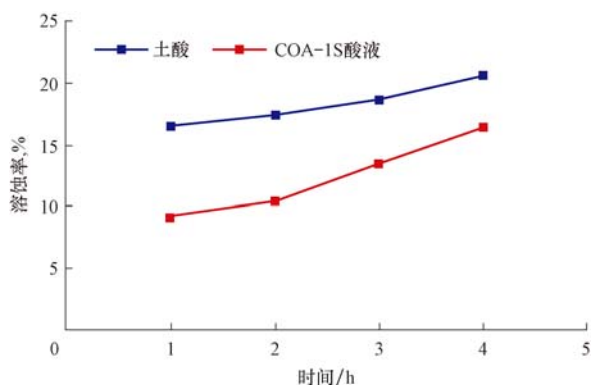


图 3 酸液溶蚀率与作用时间的关系

Fig. 3 Relationship between dissolution rate and action time of acid system

从图 3 可以看出,COA-1S 酸液的溶蚀率低于土酸,随着反应时间增长,可逐渐接近土酸的溶蚀率。

将 COA-1S 酸液和盐酸加入到不同体积的质量分数 15% 的 NaOH 溶液中,测定反应后液体的 pH 值,结果如图 4 所示。

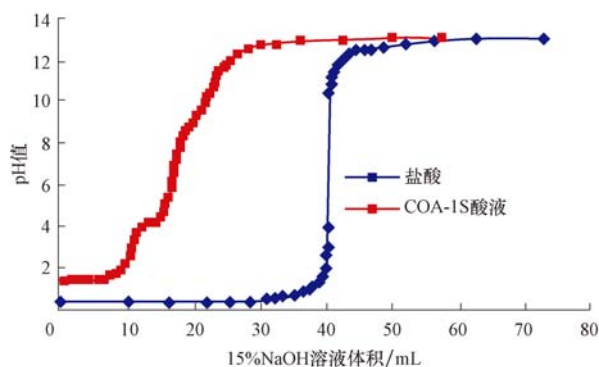


图 4 COA-1S 酸液的酸度曲线分析

Fig. 4 COA-1S acidity curve analysis

从图 4 可以看出,COA-1S 溶液中的 H^+ 是缓慢电离出的,因此可延长酸岩反应时间,扩大酸液有效作用距离,实现深部酸化解堵,具有较好的缓速性能。

2.2 螯合抑制性能

为了分析对比常用酸液与 COA-1S 酸液对金属阳离子的螯合抑制性能,分别配制土酸、多氢酸、氟硼酸和 COA-1S 酸液,并各取 50 mL 酸液放置在

烧杯中,加入相同体积的阳离子溶液,观察沉淀情况,然后将 4 种酸液分别放在 60 ℃恒温箱中 2 h,观察沉淀的变化情况,并进行过滤、烘干和称重,计算金属离子抑制率,结果见表 1。

表 1 COA-1S 酸液的螯合抑制性能

Table 1 Chelation inhibition performance of COA-1S acid

酸液	Ca^{2+} 抑制率, %	Si^{4+} 抑制率, %	Fe^{3+} 抑制率, %	Al^{3+} 抑制率, %
土酸				
多氢酸	60.7	31.4	36.3	26.4
氟硼酸	69.1	29.0	48.5	44.0
COA-1S	93.7	67.8	77.3	58.8

从表 1 可以看出,与常规酸液相比,COA-1S 酸液对 Ca^{2+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等金属离子具有较好的螯合抑制效果,能起到减少二次沉淀的作用,可满足不动管柱酸化后不返排的要求。

2.3 缓蚀性能

采用石油天然气行业标准《酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标》(SY/T 5405—1996)中的测试方法,测试带涂层 N80 钢片在 COA-1S 酸液中的腐蚀速率。首先测量 N80 钢片的表面积及质量,然后将其放入 COA-1S 酸液中腐蚀 24 h 后取出,再次称量其质量,计算得到平均腐蚀速率为 $0.4294 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (见表 2),观察发现其涂层均未脱落,说明 COA-1S 酸液对井下管柱的腐蚀速率极小,具有较好的缓蚀性能,能满足不动管柱酸化的要求。

3 现场应用

3.1 总体应用情况

截至目前,注水井不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术现场应用 3 井次,施工成功率 100%,有效率 100%,施工过程平稳有序,平均施工时间 6.0 h,增注措施后平均注水压力下降 9.2 MPa,单井增注水量 $12.3 \text{ m}^3/\text{d}$ (见表 3)。

通过对酸液及工艺的优化改进,将多项技术融合为一体,提高了降压增注效果,提高了施工的成功率和措施的有效率,且大幅缩短了施工占井周期,减少了施工设备动用量,施工步骤简便,安全风险低,同时降压增注效果显著,达到了降本增效的目的,为低渗透油田欠注井治理提供了新的技术措施。下面以 Y1-01 井为例分析其应用效果。

表 2 COA-1S 酸液的缓蚀性能

Table 2 Corrosion inhibition performance of COA-1S acid

编号	温度/℃	钢片腐蚀前的质量/g	钢片腐蚀后的质量/g		腐蚀速率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	
			8 h	24 h	8 h	24 h
1	60	159.89	159.00	158.85	0.439 8	0.439 5
2	60	145.72	145.69	145.61	0.450 4	0.450 4
3	60	154.47	154.41	154.13	0.398 3	0.398 4

表 3 不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术应用效果统计

Table 3 Statistics on the effect of pulse acid injection and acidizing stimulation for the immobilized string

井号	条件	注水压力/ MPa	配注量/ (m ³ ·d ⁻¹)	实际注水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	压降/MPa	日增注量/ m ³	累计增 注量/m ³
Y1-01	措施前	15.0	10.0	1.0			
	措施后	1.8	13.0	14.0	13.2	13.0	2 732.0
Y1-02	措施前	12.6	13.0	1.0			
	措施后	2.2	13.0	13.0	10.4	12.0	2 203.0
Y1-03	措施前	15.4	15.0	3.0			
	措施后	11.4	15.0	15.0	4.0	12.0	2 087.0

3.2 Y1-01 井的应用情况

Y1-01 井是一口注水井,该井 2015 年 10 月 29 日投注,初期配注量 10.0 m³/d,实际注水量 10.0 m³/d,注水压力 15.0 MPa;2016 年 11 月 15 日开始欠注,2016 年 11 月 27 日洗井挤注无效,配注量 10.0 m³/d,实际注水量 1.0 m³/d,注水压力 15.0 MPa。2017 年 4 月 18 日进行氟硼酸酸化,酸化后未见效,配注量 10.0 m³/d,实际注水量 1.0 m³/d,注水压力 15.0 MPa。为提高该井注水量,2017 年 11 月 4 日对该井采取不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术措施。

进行不动管柱脉冲式酸化增注施工时,首先进行反洗井作业,清洗管柱及井底杂物,建立有效循环通道;然后进行试挤,挤注压力 17.1 MPa,排量 150 L/min;连接酸化管线,将酸液罐车与备水车同时接入 400 型水泥车,调整进口闸门,酸液与水按照 1:1 比例混合注入井筒,排量 150 L/min,注入压力 17.5 MPa,待酸液到达地层后,注入压力降至 16.5 MPa;排量调整为 300 L/min 与 100 L/min 进行脉冲注入,30 s 交替一次,使其在井底产生水力冲击波,现场共实施脉冲 10 段 50 次(1 段交替 5 次),待脉冲注入改为正常注入后,施工压力由 16.5 MPa 降至 12.0 MPa;最后 4.0 m³ 酸液以 100 L/min 排量注入,以充分改善近井地带地层渗透率;注酸结束后,停泵切换到注水流程,酸化施工用时 6.5 h。

与采取不动管柱脉冲式酸化增注技术前相比,

Y1-01 井酸化后注水压力为 1.8 MPa,下降 13.2 MPa,注水量为 14.0 m³/d,增加 13.0 m³/d,视吸水指数由 0.067 m³/(MPa·d) 提高至 7.780 m³/(MPa·d),降压增注效果明显。目前,该井配注量 15.0 m³/d,实际注水量 15.0 m³/d,注水压力 5.8 MPa。Y1-01 井采取不动管柱脉冲式酸化增注技术前后的注水曲线如图 5 所示。



图 5 Y1-01 井采用不动管柱脉冲式酸化增注技术前后的注水曲线

Fig.5 Water injection curve before and after application in Well Y1-01

4 结论与建议

- 1) 研发的 COA-1S 酸液具有较好的缓速、螯合抑制和缓蚀性能,能满足注水井酸化增注的要求。
- 2) 不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术将水力脉冲与酸化技术有效结合,大幅简化了常规

酸化施工流程,室内评价性能较好,现场应用取得了较好的增注效果,具有较好的推广应用价值。

3) 建议进一步优化酸液配方,提高酸液对金属离子的螯合抑制能力,降低对地层的二次伤害。

参 考 文 献

References

- [1] 张玉荣, 闫建文, 杨海英, 等. 国内分层注水技术新进展及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 102-107.
ZHANG Yurong, YAN Jianwen, YANG Haiying, et al. Technologies of separated layer water flooding: an overview[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 102-107.
- [2] 崔传智, 盛倩, 姜亦栋, 等. 高含水期多层油藏注水层段划分方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(3): 363-366.
CUI Chuazhi, SHENG Qian, JIANG Yidong, et al. Reasonable water injection interval dividing of multilayer producing block reservoir with high water cut[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 363-366.
- [3] 孙召勃, 李云鹏, 贾晓飞, 等. 基于驱替定量表征的高含水油田注水井分层配注量确定方法[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 87-91.
SUN Zhaobo, LI Yunpeng, JIA Xiaofei, et al. A method to determine the layered injection allocation rates for water injection wells in high water cut oilfield based on displacement quantitative characterization[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 87-91.
- [4] 李积祥, 侯洪涛, 张丽, 等. 低渗油藏注水井解堵增注技术研究[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 106-108.
LI Jixiang, HOU Hongtao, ZHANG Li, et al. Research on block-removal and injection stimulation technology for water injectors in low permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 106-108.
- [5] 曾明友, 杜娟, 刘凤和. 注水井酸液体系的研究[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(2): 177-180.
ZENG Mingyou, DU Juan, LIU Fenghe. Research on acid fluid system of water injection well[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(2): 177-180.
- [6] CHIKE U, AWOLEKE O, LINUS N. Solvent/acid blend provides economic single step matrix acidizing success for fines and organic damage removal in sandstone reservoirs: a Niger-Delta case study[R]. SPE 90798, 2004.
- [7] 赵立强, 潘亿勇, 刘义刚, 等. HA 一体化砂岩酸化酸液体系的研制及其性能评价[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 57-62.
ZHAO Liqiang, PAN Yiyong, LIU Yigang, et al. Research and performance evaluation on an HA integrated acid system for sandstone acidizing[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 57-62.
- [8] 刘平礼, 兰夕堂, 王天慧, 等. 砂岩储层酸化的新型螯合酸液体系研制[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 72-75.
LIU Pingli, LAN Xitang, WANG Tianhui, et al. Development and research of a novel chelating acid system for sandstone reservoir acidification[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 72-75.
- [9] 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.
- [10] 杨乾龙, 李年银, 张随望, 等. 砂岩油藏注水井连续注入酸化技术[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 137-140.
YANG Qianlong, LI Nianyin, ZHANG Suiwang, et al. Continuous injection acidizing technique for water injector of sandstone reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 137-140.
- [11] 任向阳, 潘国辉, 龙远强. 新型分层酸化管柱技术在江苏油田的应用[J]. 断块油气田, 2008, 15(4): 120-122.
REN Xiangyang, PAN Guohui, LONG Yuanqiang. Application of tube column technology of new lamination acidification in Jiangsu Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(4): 120-122.
- [12] 刘涛. 低渗透油藏注水井水力脉冲-化学深穿透解堵技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2010.
LIU Tao. Research on hydraulic pulse-chemical deep penetration blockage removal technique in low-permeability reservoir [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2010.
- [13] 饶鹏. 低渗油藏水力脉冲波辅助深度酸化降压增注技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
RAO Peng. Research on hydraulic pulse wave assisted deep acidification technique of decreasing pressure and increasing injection in low permeability reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum(Huadong), 2013.

[编辑 滕春鸣]