

低渗灰岩水井常规酸酸化增产工作液的实验研究

余浪, 石彦平, 陈书雅, 杨现禹, 蔡记华
(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 利用有机酸缓速、低腐蚀的优点,与盐酸配合形成主酸,结合缓蚀剂等添加剂形成了一套适合于低渗灰岩水井的常规酸酸化工作液体系。通过对秭归县宝塔组灰岩的物化性能分析、静态溶蚀率、岩心酸化流动和静态腐蚀等实验,对该工作液体系进行了综合评价。结果表明:盐酸对岩粉 0.5、1.0 和 1.5 h 的平均溶蚀率为 95.1%,乙酸对岩粉 1.5、3.0 和 4.5 h 的平均溶蚀率为 83.5%,“8% 盐酸+6% 乙酸”在 4.5 h 后对岩粉的溶蚀率为 97.0%;经“8% 盐酸+6% 乙酸”酸化后,宝塔组灰岩的岩心渗透率增加了 270~1300 倍;当酸液注入速度为 1 mL/min 时,酸液突破体积最小,为 343.6 PV(孔隙体积倍数);咪唑啉类缓蚀剂可同时作为缓速剂和缓蚀剂使用,能减缓酸液与灰岩的反应速度,并减少对钻具的腐蚀。该工作液体系可有效增大灰岩含水层的渗透率,从而提高水井产量,有助于解决部分缺水地区的民生地质问题。

关键词: 低渗灰岩水井; 酸化增产工作液; 渗透率; 蚓孔; 缓蚀

中图分类号:TV213; TB14

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0097-07

Experimental study on stimulation fluids by regular acidification in low permeable limestone wells

YU Lang, SHI Yanping, CHEN Shuya, YANG Xianyu, CAI Jihua
(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The organic acid has the advantages of slow speed and low corrosion, and it forms a main acid in combination with HCl (hydrochloric acid). The main acid combines with additives such as corrosion inhibitors to form a working fluid system with conventional acids suitable for low permeable limestone water wells. Through the physical and chemical analysis, static dissolution rate, core flooding and static corrosion experiments of the Zigui Baota formation limestone, the working fluid system was comprehensively evaluated. The results showed that the average dissolution rate of HCl on rock powder after 0.5 h, 1 h and 1.5 h was 95.1%, and that of HAC (acetic acid) on rock powder after 1.5 h, 3 h and 4.5 h was 83.5%. The dissolution rate of "8% HCl +6% HAC" after 4.5 h was 97.0%. The core flooding experiment of "8% HCl +6% HAC" on Baota formation limestone core showed that the permeability of the rock sample increased 270-1300 times after acidizing. The minimum breakthrough volume of the acid solution was 343.6 pore volume (PV) when the acid injection rate is 1 mL/min. The imidazoline corrosion inhibitor can be used as both retarder and corrosion inhibitor, which can retard the reaction of acid with limestone and reduce corrosion on the drill. The acid fluid system can effectively increase the permeability of the limestone aquifer thereby increasing the well production and helping to solve the geological problems of the livelihood in some water-deficient areas.

Key words: low permeable limestone well; acidification stimulation fluid; permeability rate; wormhole; corrosion inhibition

收稿日期:2019-07-09; 修回日期:2019-09-10

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1801705);湖北省技术创新专项(2017AHB0052);武汉市科技晨光计划项目(2017050304010317)

作者简介:余浪(1996-),男,四川简阳人,在读硕士研究生,研究方向:储层增产,环境修复。

通讯作者:蔡记华(1978-),男,湖浠水人,博士,教授,博士生导师,研究方向:井壁稳定,储层保护与增产,环境修复。

1 研究背景

酸化是指用酸或潜在酸处理油气储层,使储层渗透率增加,实现油气井增产的技术^[1]。在碳酸盐岩油气藏的开发过程中,主要增产方式有基质酸化和酸压压裂。碳酸盐岩储层主要为灰岩、白云岩储层等,储层成分主要为 CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ^[2]。碳酸盐岩基质酸化中,酸蚀蚓孔的出现表明酸液对地层具有良好的效果^[3]。然而,使用盐酸等强酸会导致在井筒附近酸-岩反应过快、酸液体系的利用效率低和对钻具腐蚀性强的缺点,且因酸-岩反应迅速而导致体系易失活、产生蚓孔深度有限^[4-5]。在常规酸化中,通常采用盐酸酸化,酸化反应所生成的氯化钙(CaCl_2)、氯化镁(MgCl_2)、 CO_2 等都易溶于水,酸化后不会产生二次沉淀^[6]。有机酸液体系中,乙酸主要作为缓速酸和铁离子稳定剂广泛应用于酸化作业中,同时乙酸还具有一定的缓蚀效果,与常规强酸复配降低强酸对金属钻具的腐蚀。许志赫^[7]研究了乙酸与盐酸协同酸化的机理以及对金属腐蚀影响规律,结果表明乙酸与柠檬酸同时使用不仅可以降低酸-岩的反应速率,而且具有良好的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 控制能力。刘朝霞等^[8]介绍了一种曼尼希碱-9[#]缓蚀剂合成方法,并评价了它的缓蚀性能,其效果较优。姚远等^[9]通过分析目标油田储层特点,并结合稠化缓速酸的作用机理,研究出一套适合高温碳酸盐岩储层的稠化缓速酸液体系。Zakaria等^[10]通过研究一种新型聚合物辅助乳化酸体系,改善了碳酸盐岩基质酸化的效率。该乳化酸体系结合了增产和转移在一个过程中的优点,从而减少运营成本和复杂性。

调研发现,长江与淮河分水岭一带由于地貌以低山丘陵为主,无大型河流分布,且降雨偏少,成为鄂北严重缺水地区。该地区地下水资源匮乏,缺水严重,部分原因是含水介质的影响。碳酸盐岩类裂隙岩溶水约占总面积的10%,主要分布于南部扬子地层区的长岗和三里岗等乡镇。广水市寿山地区含水层由碳酸盐岩与页岩、砂岩等组成,地下水泉流量一般在 $200 \sim 500 \text{ m}^3/\text{d}$,单井涌水量为 $80 \sim 200 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[11-12]。湖北随县岩浆岩-变质岩区地下水分布规律由于两侧为隔水性较好的板岩和变粒岩等变质岩,加上局部碳酸岩化或断裂错动形成的灰岩、白云岩、大理岩条带富水带^[13]。

为了解决该地区缺水问题,对灰岩储层进行酸化,增大其含水层渗透率,从而达到水井增产的目的。

本研究通过岩样物理化学分析实验、岩粉静态溶蚀率实验、岩心酸化流动实验和静态腐蚀实验,提出了一套有效增加低渗灰岩渗透率的常规酸化工作液体系。

2 实验材料与仪器

2.1 实验材料

盐酸(HCl 溶液,质量浓度37%)、乙酸(CH_3COOH ,质量浓度99%)(太仓沪试剂有限公司),阴离子表面活性剂YS-1、阳离子表面活性剂YS-2、阳离子表面活性剂YS-3、非离子表面活性剂FS-1、聚丙烯酰胺PAM、聚乙二醇2000和乙二胺四乙酸二钠(EDTA-二钠)(国药集团化学试剂有限公司),氟碳表面活性剂FS-2(上海舰邦有限公司),咪唑啉类缓蚀剂(山东优索化工科技有限公司),低黏羟甲基纤维素(LV-CMC)、聚丙烯酸盐聚合物(LV-PAC)(重庆力宏精细化工有限公司),N-羟乙基乙二胺三乙酸(HEDTA,上海翰思化工有限公司),P110标准腐蚀试片(扬州科力环保设备有限公司)。

灰岩岩样采自湖北省宜昌市秭归县九畹溪镇桂垭村的宝塔组露头(以下简称“宝塔组灰岩”)。将岩样用球磨机磨成100目灰岩岩粉,备用于溶蚀率实验;利用特型岩心钻取机钻取灰岩岩心(长度为3 cm,直径2.5 cm)若干,用于后期的岩心流动实验。

2.2 实验仪器

JHCSI岩心抽空饱和试验装置(荆州市现代石油科技发展有限公司),X'Pert PRO DY2198 X-射线衍射仪(荷兰帕纳科公司),LC-MP-1A金相试样磨抛机(山东蓝畴仪器装备科技有限公司),特型岩心钻取机(杭州西湖台钻有限公司),TC-50型岩心酸化流动实验仪(江苏拓创科研仪器有限公司),XQM-4立式行星球磨机(长沙天创粉末技术有限公司),Quanta200环境扫描电子显微镜(美国FEI有限公司)。

3 实验方法与结果

3.1 灰岩岩样物化性能分析

3.1.1 X衍射分析(XRD) 宝塔组灰岩为中厚层状,风化面为灰白色,新鲜面浅灰色。将岩样进行标号,利用X'Pert PRO DY2198 X射线衍射仪进行矿物组成分析,结果如表1所示。

3.1.2 孔隙度测试 利用岩心抽空饱和试验装置,抽空岩心孔隙空气并称量,而后浸泡24 h后,擦干

称重。对比两次称重前后质量差,计算孔隙度 W 。计算公式如公式(1)所示。

$$W = \frac{4(m_1 - m_2)}{\rho \pi d^2 h} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为孔隙度,% ; m_1 为岩心浸泡后称重质量,g ; m_2 为岩心抽真空后称重质量,g ; ρ 为溶液密度,g/cm³ ; d 为岩心直径,cm ; h 为岩心高度,cm。

表 1 灰岩矿物组成分析结果 %

| 样品编号 | 石英 | 方解石 |
|------|------|-------|
| 1 | 1.46 | 98.54 |
| 2 | 1.43 | 98.57 |
| 3 | 0 | 100 |
| 4 | 1.45 | 98.55 |
| 5 | 1.71 | 98.29 |

3.1.3 扫描电镜(SEM)分析 利用 Quanta200 环境扫描电子显微镜,在秭归宝塔组灰岩岩样端面进行微观裂隙分布情况的观察,结果如图 1 所示。

3.2 酸液对灰岩的溶蚀率效果评价

3.2.1 单一酸液对灰岩岩粉的静态溶蚀率 称取 5 g 灰岩岩粉与不同浓度的酸液反应定量时间,反应过程中搅拌两次。将酸液用定量滤纸过滤、烘干、冷却后称重,对比岩粉前后质量,并通过公式(2)计算溶蚀率 S 。

$$S = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S 为溶蚀率,% ; m_2 为岩粉初始质量,g ; m_1 为过滤未溶蚀的岩粉质量,g。

不同浓度盐酸和乙酸对灰岩的溶蚀率实验结果如图 2 和 3 所示。

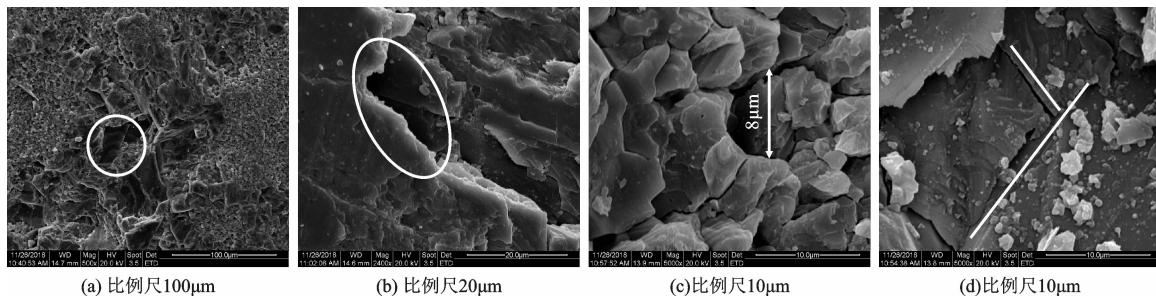


图 1 秭归宝塔组灰岩岩样端面的 SEM 图

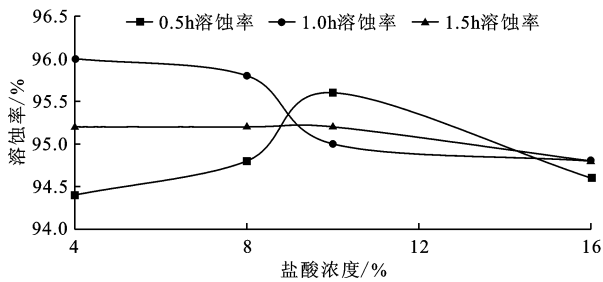


图 2 不同反应时间盐酸对灰岩岩粉的溶蚀率

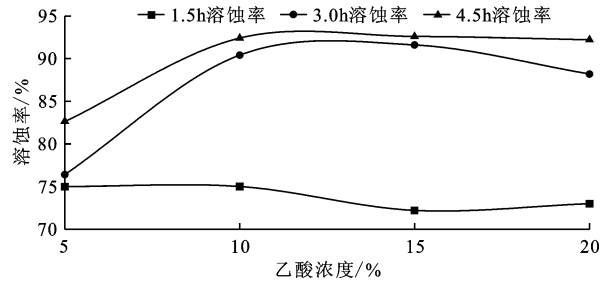


图 3 不同反应时间乙酸对灰岩岩粉的溶蚀率

3.2.2 混合酸液对灰岩岩粉的静态溶蚀率 前期实验发现,盐酸与灰岩反应过快。由于乙酸为有机弱酸,与岩粉反应速度较慢,常被用来减缓盐酸溶液的反应速度和腐蚀速度^[8]。在后期实验中,拟通过盐酸与乙酸复配形成一套适合于宝塔组灰岩的基质酸化体系。

油气井酸化常用盐酸浓度为 14% ~ 28% ,实验设定酸液体系中氢离子总量为 14% ,利用不同配比组合的酸液体系进行秭归宝塔组灰岩的静态溶蚀实验。其实验结果如图 4 所示。

3.3 岩心酸化流动实验

利用 TC - 50 型岩心酸化流动实验仪驱替酸液对岩心进行酸化实验。实验渗透率的测量计算见公式(3)。

$$K_w = \frac{q_w \mu_w L}{A(P_2 - P_1)} \times 10^2 \quad (3)$$

式中: K_w 为液体渗透率,mD ; q_w 为一定时间内的液体流量,mL/min ; μ_w 为液体在实验温度下的黏度,MPa · s ; L 为灰岩岩心长度,cm ; A 为灰岩岩心横截面积,cm² ; P_2 为进口压力,MPa ; P_1 为出口压力,MPa。

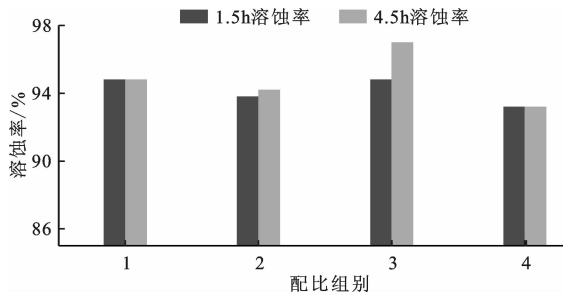


图4 不同配比盐酸与乙酸的静态溶蚀率

实验结果和酸化后岩样照片如图5和表2所示。

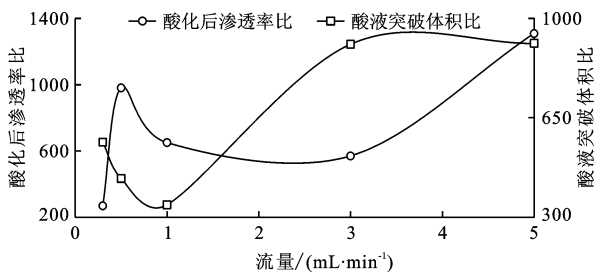


图5 不同流量下“8% HCl+6% HAC”对灰岩岩心的酸化后渗透率比和酸液突破体积比变化曲线

表2 不同流速下“8% HCl+6% HAC”对3cm灰岩岩样酸化后照片

| 编号 | 流量/ (mL·min ⁻¹) | 侧面 | 正面 |
|----|--------------------------------|----|----|
| 1 | 0.3 | | |
| 2 | 0.5 | | |
| 3 | 1.0 | | |
| 4 | 3.0 | | |
| 5 | 5.0 | | |

3.4 酸液的腐蚀性评价

3.4.1 酸液配比对试片腐蚀性的影响 将P110腐蚀试片(试片表面积为2800 mm²)称重,记录编号和质量数据,然后放入酸液中浸泡24 h,取出试片用水冲洗,再用无水乙醇清洗表面铁锈,冷风吹干后称重。酸液的腐蚀性能指标用腐蚀速率V_i来评价,其计算公式为:

$$V_i = \frac{m_2 - m_1}{A_i \Delta t} \times 10^6 \quad (4)$$

式中:V_i为腐蚀速率,g/(m²·h);m₂为试片腐蚀前质量,g;m₁为试片腐蚀后质量,g;A_i为试片表面积,mm²;Δt为反应时间,h。

不同配比盐酸与乙酸的腐蚀试片实验结果如表3所示。

表3 不同酸液对试片的腐蚀速率

| 酸液 | 腐蚀前 质量/g | 腐蚀后 质量/g | 腐蚀速率/ (g·m ⁻² ·h ⁻¹) |
|--------------|-------------|-------------|--|
| 14% 盐酸 | 18.82 | 18.47 | 2.60 |
| 4% 盐酸+10% 乙酸 | 17.96 | 17.66 | 2.23 |
| 6% 盐酸+8% 乙酸 | 18.66 | 18.43 | 1.71 |
| 8% 盐酸+6% 乙酸 | 18.47 | 18.17 | 2.23 |
| 10% 盐酸+4% 乙酸 | 18.71 | 18.38 | 2.46 |
| 14% 乙酸 | 18.99 | 18.79 | 1.49 |

3.4.2 不同缓蚀剂的作用效果评价 选取不同缓蚀剂(包括3种表面活性剂、2种提粘剂、咪唑啉类缓蚀剂、聚乙二醇、EDTA和HEDTA),配伍主酸(8%盐酸+6%乙酸)进行腐蚀试片实验。实验结果如表4所示。

表4 不同缓蚀剂加入主酸后的腐蚀速率结果

| 酸液 | 添加的 缓蚀剂 | 腐蚀前 质量/g | 腐蚀后 质量/g | 腐蚀速率/ (g·m ⁻² ·h ⁻¹) |
|----|-------------|-------------|-------------|--|
| 主酸 | 0.1% YS-1 | 18.29 | 17.88 | 6.10 |
| | 0.1% YS-3 | 18.15 | 18.10 | 0.74 |
| | 0.1% FS-2 | 17.83 | 17.78 | 0.74 |
| | 0.1% 咪唑啉 | 18.09 | 18.08 | 0.15 |
| | 0.2% LV-PAC | 18.46 | 18.22 | 3.57 |
| | 0.2% LV-CMC | 17.99 | 17.95 | 0.60 |
| | 0.5% 聚乙二醇 | 18.48 | 18.34 | 2.08 |
| | 0.5% EDTA | 18.23 | 18.13 | 1.49 |
| | 0.5% HEDTA | 18.25 | 18.12 | 1.93 |

通过上述实验发现咪唑啉类缓蚀剂和 LV - CMC 酸液对金属试片的缓蚀效果较好,对 P110 试片的腐蚀速率分别为 $0.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。因此,后期实验确定缓蚀剂组合为: $0.2\% \text{ LV} - \text{CMC} + 0.1\%$ 咪唑啉类缓蚀剂。

3.5 优选配方的岩心酸化流动实验

选取 $0.2\% \text{ LV} - \text{CMC}$ 和 0.1% 咪唑啉类缓蚀剂作为缓蚀剂加入主酸中,并进行岩心酸化流动实验,实验所用工作液为“主酸 + $0.2\% \text{ LV} - \text{CMC} + 0.1\%$ 咪唑啉类缓蚀剂”,实验结果如图 6 所示。

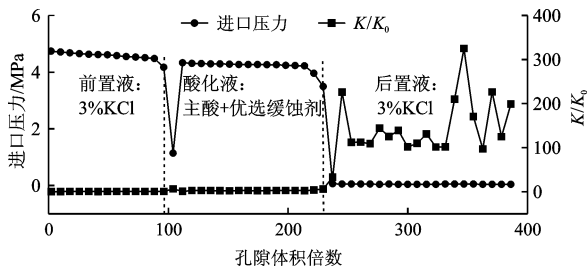
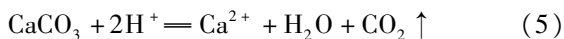


图 6 主酸岩心酸化流动实验 K/K_0 变化结果

4 结果分析与讨论

4.1 灰岩岩样物化性能分析

4.1.1 X 衍射分析 XRD 由表 1 可以看出,实验所用灰岩主要矿物成分为方解石,含极少量石英。所以,酸液主要是与岩样中的方解石矿物(化学成分为 CaCO_3)进行反应,反应方程式如式(5):



4.1.2 孔隙度测试 岩样的平均孔隙体积为 0.025 mL ,计算后的孔隙度平均值为 0.09% ,孔隙度极低。

4.1.3 灰岩电镜扫描实验 观察秭归宝塔组灰岩的 SEM 图 1,可以发现在灰岩端面存在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 左右不同尺寸大小的裂隙,图 1(c)明显的裂隙长度为 $8 \mu\text{m}$ 。而这些裂隙的存在为地层流体的流动提供了天然通道。但是由于通道尺寸较小,存在毛细管力等作用力致使通道大大减小了流体输送效率。

4.2 酸液对灰岩的溶蚀率性能评价

4.2.1 单一酸液对灰岩岩粉的静态溶蚀率 通过实验发现盐酸对灰岩具有强溶蚀能力,且酸 - 岩反应速率过快,在 0.5 h 对灰岩的溶蚀率高达 94% 以上,而后随着浓度和时间的增加,盐酸对灰岩的溶蚀率趋于稳定,最高为 96% 。乙酸对秭归宝塔组灰岩的溶蚀效果随着反应时间的增加而增加;在较长的反应时间下,乙酸对秭归宝塔组灰岩的溶蚀效果会随着浓度的增加而增加,浓度为 10% 时趋于稳定,

对灰岩最高溶蚀率为 92.6% 。原因是乙酸与灰岩反应生成乙酸钙、乙酸镁的溶解度不高,乙酸的加量大于 15% 后,生成物会沉淀,这将导致沉积问题,干扰甚至阻止了流体的流动^[14]。另外,乙酸是弱酸,弱酸电离不完全,在与灰岩岩粉反应时,溶液本身会跟随反应电离出更多的氢离子,使得反应持续进行,所以时间越长,溶蚀率总体呈上升趋势。

4.2.2 混合酸液对灰岩岩粉的静态溶蚀实验 由于在 4 组酸液体系中盐酸属于无机强酸,所以在水溶液中含有大量的游离状态的氢离子,其直接与灰岩岩粉(主要成分为 CaCO_3)相互作用,所以在经过 1.5 和 4.5 h 后酸液对灰岩的溶蚀,其对秭归宝塔组灰岩的溶蚀率达到 93% 以上(图 4)。在上述 4 组静态溶蚀实验中,第 1、2、4 组在 1.5 h 后的溶蚀率分别为 94.8% 、 94.8% 、 93.2% ,而在 4.5 h 后的溶蚀率分别为 94.8% 、 94.2% 、 93.2% ,经过两个时间段的溶蚀效果对比,发现第 3 组酸液对秭归宝塔组灰岩的溶蚀效果并没有出现明显的增长。第 3 组配比下的酸液体系在 1.5 h 对秭归宝塔组灰岩的溶蚀率为 94.8% ,而同样情况下经过 4.5 h 后对灰岩的溶蚀率提升至 97% ,增加了 2.3% 。说明在该组酸液配比体系对灰岩溶蚀作用能力最强。

4.3 酸-岩反应对灰岩渗透率的影响评价

“ 8% 盐酸 + 6% 乙酸”对 3 cm 灰岩岩心的酸化实验结果显示,酸化后岩心的渗透率增加 270 至 1300 倍。

酸液突破体积比是指蚓孔突破时消耗的酸液体积与岩心孔隙体积的比值,最小突破体积比对应的酸液注入速度被称为该酸液质量分数下的最佳注入速度^[15]。由图 5 可知,随着酸液的注入速度增加,酸液突破体积先减小后增加;在 $1 \text{ mL}/\text{min}$ 这个点,酸液突破体积最小为 343.6 PV 。由于酸 - 岩反应存在着 H^+ 传质和酸 - 岩表面反应两个过程,酸化后的溶蚀形态取决于上述两个过程的相对速率。当 H^+ 传质速率接近于表面反应速率才会形成单一蚓孔^[15]。蚓孔宽度大小足以贯通灰岩中的微裂隙和孔隙。考虑到酸液注入成本问题,可选择 $1 \text{ mL}/\text{min}$ 流速为最优注入速度。

4.4 优选酸液腐蚀性能评价

4.4.1 不同配比盐酸与乙酸的腐蚀试片实验结果 由表 3 可知, 14% 盐酸对金属试片的腐蚀速率最高,为 $2.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 14% 乙酸的腐蚀速率最低,为 $1.49 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;不同配比的腐蚀速率均低于 14% 盐酸的腐蚀速率,说明相较于盐酸,乙酸对金属

的腐蚀速率更低。

分析其原因主要为:盐酸为强酸,电离出大量的 H^+ ,与金属试片的Fe快速反应,产生 $FeCl_2$ 和 H_2 。但是乙酸属于弱酸,其电离的 H^+ 的程度较为缓慢,与试片反应速率缓慢进行,所以在一定时间后,盐酸所消耗Fe的量相较于乙酸更多。因此用乙酸浸泡的试片质量变化幅度最小,试片表面较为光滑,而盐酸浸泡后的试片表面粗糙,颜色较深。

4.4.2 缓蚀剂的作用评价 4种表面活性剂中,对酸液的缓蚀能力最强的试剂是咪唑啉类缓蚀剂,其能将同等时间主酸的腐蚀速率由 $2.23\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降为 $0.15\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。其次为YS-3和FS-2,YS-1无缓蚀效果,反而加速试片的腐蚀;在两种提黏剂中,LV-CMC对酸液的缓蚀能力比LV-PAC强;聚乙二醇、EDTA、和HEDTA对酸液的缓蚀能力则处于中等水平。分析其原因主要为:酸液体系中加入LV-CMC能够有效地提高酸液体系的黏度,随着酸液黏度的提高, H^+ 在溶液中迁移速度变缓,与岩石表面的接触时间增加。这个过程不仅有效地降低了酸液滤失,而且因为酸-岩接触时间增加,酸液地利用效率明显增加,形成蚓孔的宽度增加。另一方面,在咪唑啉类缓蚀剂的缓蚀作用过程中,咪唑啉自带的疏水基团能在岩石表面形成一种疏水层,减少了 H^+ 与金属表面的接触,从而起到缓蚀作用。在岩石表面形成的憎水层能够比较有效地阻缓酸液体系中的 H^+ 与岩样进行反应^[16]。

4.5 优选的工作液配方

“主酸+优选缓蚀剂”的渗透率增加100~300倍左右,酸化侧面形成孔的平均直径为1.60 mm。其与岩样蚓孔形成速率为 $0.78\text{ mm}/\text{min}$,相较于主酸与灰岩岩心酸化后,岩样蚓孔形成速率 $1\text{ mm}/\text{min}$,其蚓孔形成速率下降了22%。酸液中添加的优选缓蚀剂不仅能够有效地减缓金属腐蚀速率,也能降低蚓孔形成速率,起到一定的缓速效果。

综合静态溶蚀率实验、岩心酸化流动实验和静态腐蚀性评价实验,对比和分析各实验结果,确定基岩碳酸盐岩水井增产酸化常规酸工作液体系配方为“8%盐酸+6%乙酸+3%KCl+0.2%LV-CMC+0.1%咪唑啉类缓蚀剂”。该套体系以盐酸和乙酸配合酸化灰岩为主,盐酸酸化出端面蚓孔突破口,乙酸进一步酸化形成蚓孔,连通灰岩中的微孔隙,提高灰岩的渗透率;KCl作为黏土防膨剂,防止酸化过程中酸液引起储层中黏土膨胀、分散、运移造成对储层的二次损害;LV-CMC和咪唑啉类缓蚀剂作为缓速

剂和缓蚀剂,减缓主酸与灰岩的反应速度,从而更容易形成有效的蚓孔,且减缓酸液与钻具设备的腐蚀反应,减小对钻具设备的损坏程度。

5 结论

本文通过岩样物化分析实验、岩粉静态溶蚀率实验、岩心酸化流动实验和静态腐蚀试片实验,得出了一套适合秭归宝塔组灰岩的常规酸酸化工作液体系,主要结论如下:

(1)秭归县宝塔组灰岩以方解石为主、含有少量石英,孔隙度平均值为0.09%,岩石端面存在5~50 μm 左右不同尺寸的裂隙。

(2)盐酸对岩粉0.5、1.0和1.5 h的平均溶蚀率为95.1%,乙酸对岩粉1.5、3.0和4.5 h的平均溶蚀率为83.5%，“8%盐酸+6%乙酸”在4.5 h对岩粉的溶蚀率为97.0%。

(3)岩心酸化流动实验结果表明,经“8%盐酸+6%乙酸”酸液酸化后,宝塔组灰岩的渗透率能增加270~1300倍;注入流量为 $1\text{ mL}/\text{min}$ 的酸液突破体积最小,为343.6 PV。

(4)14%盐酸对P110试片的腐蚀速率高达 $2.6\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,14%乙酸的腐蚀速率则低至 $1.49\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。“8%盐酸+6%乙酸”的腐蚀速率为 $2.23\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而0.1%的咪唑啉加入混合酸后,腐蚀速率低至 $0.15\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

(5)将LV-CMC与咪唑啉类缓蚀剂加入到主酸后形成的酸化工作液(8%盐酸+6%乙酸+3%KCl+0.2%LV-CMC+0.1%咪唑啉类缓蚀剂),能将宝塔组灰岩的渗透率增加100~300倍左右,蚓孔形成速率较主酸更慢,且具有更优的缓蚀效果。

参考文献:

- [1] 付美龙,唐善法,黄俊英. 油田应用化学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [2] WALKER M L, DILL W R, BESLER M R, et al. Iron control in west texas sour-gas wells provides sustained production increases [J]. Journal of Petroleum Technology. 1991,43(5):603-607.
- [3] 薛衡,黄祖熹,赵立强,等. 考虑岩矿非均质性的前置液酸压模拟研究[J]. 天然气工业. 2018,38(2):59-66.
- [4] LEPAGE J, DE WOLF C, BEMELAAR J, et al. An environmentally friendly stimulation fluid for high-temperature applications[J]. SPE Journal, 2011,16(1):104-110.
- [5] MAHMOUD M, NASR-EL-DIN H A, DE WOLF C, et al. Evaluation of a new environmentally friendly chelating

- agent for high-temperature applications [J]. SPE Journal, 2011, 16(3): 559 - 574.
- [6] 张磊. 碳酸盐岩油藏微酸化体系研究[J]. 石油化工应用, 2019, 38(4): 51 - 54 + 76.
- [7] 许志赫. 乙酸在酸化工作液中的作用[J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(5): 13 - 15.
- [8] 刘朝霞, 张贵才, 孙铭勤. 一种高温盐酸酸化缓蚀体系的研究与评价[J]. 石油与天然气化工, 2004, 33(6): 430 - 432 + 3.
- [9] 姚远, 袁志华. 适用于高温碳酸盐岩储层稠化缓速酸液体系研究[J]. 能源化工, 2018, 39(2): 50 - 54.
- [10] ZAKARIA A S, NASR - EL - DIN H A. A novel polymer-assisted emulsified-acid system improves the efficiency of carbonate matrix acidizing[J]. SPE Journal, 2016, 21(3): 1061 - 1074.
- [11] 吴德宽, 刘波. 鄂北丘陵山区表层地下水富水性等级划分探析——以广水寿山地区为例[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 830 - 834.
- [12] 李智民, 刘云彪, 赵德君, 等. 鄂北严重缺水地区地下水富集模式与找水实践[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 899 - 903.
- [13] 卞学军, 王宇驰, 梁晓艳. 鄂北丘陵山区变质岩 - 岩浆岩区地下水富集规律与供水模式研究[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 78 - 83.
- [14] FINŠGAR M, JACKSON J. Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review [J]. Corrosion Science, 2014, 86: 17 - 41.
- [15] 齐宁, 李柏杨, 方明君, 等. 基于碳酸盐岩酸化溶蚀形态的酸液最优注入速度界限[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 117 - 122.
- [16] 张军. 咪唑啉类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.

(上接第96页)

- [8] 李红颖, 秦丽杰, 王晔旻. 长春市玉米生产水足迹时序变化及影响因素研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(2): 120 - 126.
- [9] 李虔辉. 西北干旱区域水资源管理——以固原市为例[J]. 河南科技, 2013(13): 181.
- [10] 赵芮. 基于水足迹的宁夏中部干旱带扬黄灌区种植业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [11] 金谦, 桂东伟, 高霄鹏, 等. 新疆主要农作物生产水足迹研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 243 - 249.
- [12] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard [M]. London, UK: Earth Scan, 2011.
- [13] 闫滨, 黄万霞, 刘羽婷. 考虑时间维度的灰水足迹核算与评价——以浑河大伙房水库上游段为例[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 40 - 45.
- [14] 李亚婷, 朱荣, 虎芳芳, 等. 宁夏中部干旱带主要粮食作物生产水足迹分析[J]. 农业科学研究, 2016, 37(2): 20 - 24.
- [15] 李亚婷. 基于水足迹的宁夏中部干旱带农业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [16] 于成, 张祖陆. 山东省冬小麦夏玉米作物生产水足迹研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 202 - 203 + 213.
- [17] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 22 - 27 + 33.
- [18] 徐鹏程, 张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 232 - 237.
- [19] 苏明涛, 张郁, 靳英华. 吉林省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 26 - 30.